www.engstroy.spb.ru

Инженерно-строительный журнал

научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

№7(9) октябрь-ноябрь 2009

СЕТИ

СОБЫТИЯ

ТЕХНОЛОГИИ

РАСЧЕТЫ

МЕТОДЫ

Курсы повышения квалификации

Приглашаются специалисты строительных и проектных организаций, в том числе непосредственно занятые в сфере строительного производства.
Курсы проводятся в течение 2-3 недель в вечернее время на базе факультета или на территории заказчика. По окончании слушателям выдается удостоверение о повышении квалификации государственного образца.
Курсы проводятся по следующим направлениям:

Наименование курса	Продолжительность	Стоимость
Выполнение функций заказчика-застройщика	*2 недели*	*10000*
Управление строительной организацией	*2 недели*	*15000*
Технология и контроль качества строительства	*3 недели*	*18000*
Разработка проектов организации строительства	*2 недели*	*11000*
Проектирование металлических конструкций	*2 недели*	*12000*
Календарно-сетевое планирование в строительстве	*2 недели*	*10000*
Проектирование и монтаж систем вентиляции	*2 недели*	*12000*
Проектирование и монтаж систем отопления	*2 недели*	*10000*
Электроснабжение и электрооборудование объектов	*2 недели*	*11000*
Обследование зданий и сооружений	*2 недели*	*12000*
Геодезические разбивочные работы в строительстве	*2 недели*	*15000*
Сметное дело в строительстве	*2 недели*	*18000*

Возможен подбор преподавателей и организация корпоративного курса по любой интересующей заказчика тематике в сфере строительства. Курсы проводятся как на базе факультета, так и на территории заказчика.
Университет также проводит корпоративный курс «Основы строительного дела», предназначенный для сотрудников строительных организаций, не занятых непосредственно в производстве (менеджеров, юристов, экономистов и т.п.).

Курсы профессиональной подготовки

Курсы предназначены для специалистов строительных и проектных организаций, желающих овладеть работой в программных продуктах для автоматизированного проектирования, расчета строительных конструкций, календарного и сетевого планирования.
Курсы проводятся в течение 1-2 недель в вечернее время на базе факультета. Возможна организация курса на территории заказчика в удобное ему время.

Наименование курса	Продолжительность	Стоимость
Проектирование зданий и сооружений с использованием AutoCAD	*8 дней*	*7000*
Проектирование строительных конструкций с использованием SCAD Office	*8 дней*	*12000*
Проектирование зданий и сооружений с использованием Allplan	*2 недели*	*7000*
Планирование и управление строительными проектами с использованием MS Project	*5 дней*	*7000*

Контакты

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 301
552-94-60, 535-79-92
stroikursi@mail.ru
www.stroikursi.spb.ru

Http://www.engstroy.spb.ru – полнотекстовая версия журнала в сети Интернет. Бесплатный доступ, обновление с каждым новым выпуском.

Инженерно-строительный журнал
научно-прикладное издание

ISSN 2071-4726

Специализированный научный журнал

Периодичность: 8 раз в год

Учредитель и издатель:

ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Адрес редакции:

195251, СПб, ул. Политехническая, д. 29, Гидрокорпус-2, ауд. 301

Главный редактор:

Вера Михайловна Якубсон

Редакционный совет:

Д.э.н., проф. ГОУ СПбГПУ, вице-губернатор Санкт-Петербурга А.И. Вахмистров
Академик РАН, д.т.н., проф., президент ГОУ СПбГПУ Ю.С. Васильев
Член-корр. РАН, д.т.н., проф., проректор ГОУ СПбГПУ по научной и инновационной деятельности А.И. Рудской
Д.э.н., проф., директор Санкт-Петербургского союза строительных компаний «Союзпетрострой» Л.М. Каплан
Д.т.н., проф., декан ИСФ ГОУ СПбГПУ А.И. Альхименко
Д.т.н., проф., зав. каф. ТОЭС ГОУ СПбГПУ Н.И. Ватин
И другие. Полный список редсовета и редколлегии – на веб-сайте журнала.

Установочный тираж 800 экз.

Контакты:

Тел. 297-59-49

E-mail engstroy@inbox.ru

Http://www.engstroy.spb.ru

Содержание

СОБЫТИЯ

День финского энергоаудита в России 2
Малоэтажное строительство в Ленобласти 4

ТЕХНОЛОГИИ

О.М. Львова, К.Ю. Павлович. Применение защитных экранов из труб при строительстве подземных сооружений в Санкт-Петербурге 6
Д.С. Котов. Деформации усадки бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями 11

ПРЕДСТАВЛЯЕМ КОЛЛЕГ

Институт БелНИИС, г. Минск, Республика Беларусь 10

СЕТИ

А.А. Фролов. Бетонные отопительные приборы 22
В.С. Слепченок, Г.П. Петраков. Система теплоснабжения Санкт-Петербурга на современном этапе и возможности ее модернизации 26
В.М. Васильев, А.В. Малков. К разработке генеральной схемы водоотведения г. Уфы 30
Л.Л. Гошка. К вопросу о необходимости внедрения эффективных систем климатизации зданий 33

МЕТОДЫ

А.В. Улыбин, С.Д. Федотов. Применение ультразвукового метода для оценки зоны повреждения железобетона после пожара 38

РАСЧЕТЫ

И.А. Войлоков, А.М. Горб. Расчет конструкций промышленных полов с учетом динамического воздействия нагрузок от перемещения грузоподъёмного транспорта 41
В.М. Жгутов. Математические модели деформирования ортотропных и изотропных ребристых оболочек при учете ползучести материала 46
В.М. Жгутов. Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. I 55

При перепечатке ссылка на издание обязательна

На обложке – учебная лаборатория по инженерным сетям финского университета «Mikkelin ammattikorkeakoulu» (MAMK).

День финского энергоаудита в России

11 ноября Государственная Дума приняла в третьем чтении закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ». Этот закон многократно обсуждался в различных кругах, в основном касаемо запрета на лампы накаливания с 2011 года. Между тем закон включает в себя множество других, также революционных требований. Так, устанавливаются строгие нормы по снижению энергопотребления и разработки программ энергосбережения для бюджетных организаций, государственных компаний и муниципалитетов. Организации с крупными затратами на энергоресурсы обяжут проходить энергетические обследования не реже 1 раза в 5 лет. Результатом энергетического обследования является получение энергетического паспорта, в котором отмечается продвижение по шкале энергоэффективности.

Для России энергетическое обследование, энергетический паспорт предприятия – все это нововведения, которые для многих звучат непонятно. В Финляндии энергоаудит проводится с 80-х годов XX века, хотя до сих пор в стране нет закона, предписывающего это делать. 9 ноября в Генеральном консульстве Финляндии в Санкт-Петербурге проходил семинар под названием «День обучения энергоаудиту. Практика и результаты финских программ в сфере энергоаудита». Представители финских компаний делились своим опытом в области, которая для России пока нова. Как отметил Сеппо Силвонен, глава отделения компании «Motiva Oy», причин для энергосбережения существует несколько:

1) идеи/разум;
2) рыночные силы;
3) предписания.

В России было принято решение сразу начать с третьего пункта, т.к. рыночные силы у нас в этой области работают хуже, чем в Европе. На данный момент мало кто заинтересован в реальной энергоэффективности зданий, поскольку строят и эксплуатируют их разные организации. Также, как известно, более низкая стоимость ресурсов делает энергоэффективные технологии в России не такими выгодными, как в Европе.

В Финляндии же основной движущей силой энергоаудита, или энергетического осмотра, являются именно рыночные силы. Для их активизации государство предоставляет компенсацию расходов на энергоаудит и субсидии на меры по повышению энергоэффективности, рекомендуемые аудитором. Что же такое энергоаудит? Это процедура, включающая оценку нынешнего энергопотребления, предложение мер по экономии и составление отчета по установленной форме, необходимого для получения субсидий и т.п. Несмотря на то, что рыночные механизмы в энергосбережении работают, по словам С. Силвонена, их недостаточно для того, чтобы к 2020 г. достичь целей, поставленных Евросоюзом: повышения эффективности энергопотребления на 20% и понижения выбросов парниковых газов на 20%. Необходимо введение соответствующего закона.

Пока же в Финляндии существует добровольная система энергоаудита, и о ней рассказывали участники мероприятия. Одним из самых подробных был доклад Хеймо Леппянена, руководителя проекта Инженерного бюро «Улоф Гранлунд АО». Первая цель аудитора – оценить реальное энергопотребление на предприятии. Поэтому, кроме изучения проектной документации и других данных, предоставляемых клиентом, необходимо также проводить полевые работы. К ним относится снятие показаний с приборов учета, измерение температур в различных помещениях и на различных поверхностях (потеря тепла коробкой здания) и т.п. Также проводится опрос сотрудников предприятия, чтобы определить реальный режим работы тех или иных приборов, потребности людей по потреблению энергии. Кроме того, у персонала зачастую есть собственные идеи по энергосбережению.

Основная цель энергоаудита – предложение мер по экономии энергии. При этом нужно учитывать множество моментов. Например, от остаточного срока работы систем, потребляющих энергию, зависит необходимость применения масштабных мер. Главный принцип энергоаудита – комплексный анализ: экономия в одном виде энергии может вызвать увеличение в другом, при внедрении мер по экономии может пострадать комфорт потребителей или появиться новые затраты на обслуживание и т.п. Все это нужно учитывать при подготовке комплекса мер по энергосбережению и калькуляции необходимых инвестиций.

Х. Леппянен выделил 7 самых популярных мер по энергосбережению в зданиях общественного типа:

1) уменьшение продолжительности работы системы вентиляции;
2) изменения в освещении (введение энергосберегающих ламп, изменение режима работы, введение системы управления и т.д.);

3) регулировка температурных настроек (системы отопления и вентиляции);
4) снижение потребления воды за счет уменьшения напора;
5) изменение тарифа оплаты на более выгодный;
6) регулировка электрообогрева (защита от замерзания, обогрев машин и т.д.);
7) улучшение системы рекуперации тепла (существующей или новой).

Как отмечали многие докладчики, для работы в качестве аудитора необходимо техническое образование, а также знание специфики конкретной отрасли, в которой осуществляется энергоаудит. Это необходимо для того, чтобы правильно «читать» технологические процессы на предприятии и предлагать адекватные данной отрасли меры энергосбережения. Так, доклад Яркко Олкинуора, старшего консультанта «Poyry Building Services Oy», был посвящен энергоаудиту систем централизованного теплоснабжения (ЦТ). На основе своего опыта энергетического обследования Я. Олкинуора выполнил сопоставление российской (восточно-европейской) и финской систем ЦТ.

Прежде всего, разница между отечественной и финской системами теплоснабжения экономическая. В России теплоснабжение является частью стандартного социального пакета для населения, соответственно, теплоснабжающие компании субсидируются органами власти. В Финляндии это прибыльный бизнес для теплоснабжающих компаний и источник доходов для городских властей. С этим связаны и все другие различия. Тарифы также регулируются не нормативами, как в России, а на основе реального потребления. Находясь в центре внимания общественности, финская система теплоснабжения вынуждена быть понятной и прозрачной с финансовой и технической точек зрения. Поскольку схема потребления в скандинавском типе ЦТ ориентирована на пользователя систем, то они более эффективно эксплуатируются и проходят техническое обслуживание. Все это в конечном счете приводит к тому, что финская система центрального теплоснабжения более конкурентоспособна, чем российская.

Подробному анализу существующей в Санкт-Петербурге системы теплоснабжения посвящена статья на стр. 26.

Вера Якубсон

Малоэтажное строительство в Ленобласти

19 ноября Правительство Ленинградской области совместно с ЗАО «Петербургский строительный центр» проводили конференцию «Развитие малоэтажного строительства в Ленинградской области, вопросы подготовки инженерной инфраструктуры и внедрение новых строительных технологий».

Первая часть конференции была посвящена анализу современной ситуации на рынке малоэтажного строительства. По словам Анатолия Петровича Каталевича, председателя Комитета по строительству Ленинградской области, положение строительной сферы в области довольно хорошее, объем ввода жилья в кризисный 2009 год вырос на 12,4%. Тем не менее, ситуация, конечно, могла быть лучше. А.П. Каталевич отметил основные сдерживающие факторы для дальнейшего развития малоэтажного строительства:

1) падение уровня доходов населения, и, соответственно, покупательной способности;
2) повышение процентных ставок по ипотеке;
3) невыгодные условия присоединения стройплощадок к инфраструктуре.

На деле, последняя проблема намного шире и состоит в целом в недостатке необходимых инженерных сетей. Как отметил один из присутствующих, одной из основных проблем является система водоснабжения и водоотведения. По словам А.П. Каталевича, вопрос решается, в том числе, через проект Невско-Ладожского водовода (на данный момент находится на стадии инженерных изысканий).

Другой крупной проблемой является, собственно, получение земельных участков под застройку. В таких востребованных районах, как Всеволожский, Выборгский, Приозерский, большое количество находящихся в федеральной собственности участков просто пустует. По федеральному закону №161 от 24.07.2008 «О содействии развитию жилищного строительства» такие земли теперь можно изымать и продавать – по мнению А.П. Каталевича, это улучшит ситуацию на рынке. Также с 2008 г. действует областной закон №105-ОЗ «О бесплатном предоставлении отдельным категориям граждан земельных участков для индивидуального жилищного строительства на территории Ленинградской области».

Другим вопросом, который поднимали многие докладчики, было качество, а соответственно, комфорт и безопасность малоэтажного строительства. Виталий Сергеевич Григоренко, председатель Комитета государственного строительного надзора и государственной экспертизы Ленинградской области, в своем докладе озвучил стандартную схему строительства: получение технических условий, разработка инженерных сетей и прохождение государственной экспертизы. Тем не менее, по его словам, при малоэтажном строительстве эта схема часто нарушается, в том числе строятся дома без разрешения на строительство и прохождения экспертизы.

С другой стороны, один из докладчиков, генеральный директор ООО «Форвуд Девелопмент» Владимир Николаевич Спиридонов, отметил, что по закону индивидуальные малоэтажные дома не обязаны проходить государственную экспертизу (как отметил А.П. Каталевич, речь идет о конструктивных решениях, а не о смете, которая проходит экспертизу всегда). По данным В.Н. Спиридонова, также не подлежат государственной экспертизе проекты малоэтажных социальных объектов, разработанные его компанией, например, проект детского сада на 75 мест, специально предназначенный для районов с малой плотностью населения.

Тема экономичности и энергоэффективности малоэтажных зданий в кризисных условиях приобрела особую актуальность. Комплексной оценке стеновых материалов с этой точки зрения был посвящен доклад Глеба Иосифовича Гринфельда, начальника отдела технического развития ООО «Аэрок СПб». Он выделил три основных критерия экономичности здания:

1. Адекватное сопротивление теплопередаче. Должно быть не ниже нормативного, значительное его увеличение не несет экономической выгоды.
2. Долговечность. На данный момент нет ни нормативных требований по этому параметру, ни общепризнанной методики его измерения. Что касается материалов, то об их долговечности можно судить пока только по имеющемуся опыту. Так, известно, что дома из автоклавного газобетона в Риге 1939 года Постройки находятся в приемлемом состоянии.
3. Суммарные затраты на возведение и эксплуатацию. Необходимо учитывать не только стоимость материалов, но и стоимость последующей эксплуатации конструкций.

Таким образом, доклад Г.И. Гринфельда поднял большой пласт проблем, связанных с выбором не только строительных материалов, но и в целом конструктивной схемы здания.

Вера Якубсон

Международная научно-практическая конференция
в Санкт-петербургском государственном политехническом университете

I Секция
“Строительные конструкции,
здания и сооружения”

II Секция
“Основания и фундаменты,
подземные сооружения”

XXXVIII Неделя науки
ГОУ СПбГПУ
01-04.12.2009

III Секция
“Строительные материалы
и изделия”

IV Секция
“Теплоснабжение, водоснабжение,
вентиляция, кондиционирование воздуха,
газоснабжение, освещение”

V Секция
“Технология и организация строительства”

+7(812)535-79-92, +7(812)552-94-60
Nirs-toes@mail.ru Http://www.stroikafedra.spb.ru/

Применение защитных экранов из труб при строительстве подземных сооружений в Санкт-Петербурге

Аспирант О.М. Львова*,
ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
начальник отдела тоннельных сооружений К.Ю. Павлович,
ГУП «Ленгипроинжпроект»

Часто возникает потребность в строительстве подземных сооружений (пешеходные переходы, автодорожные тоннели, станции метрополитена) в условиях плотной городской застройки, а также под автодорожными и железнодорожными магистралями. Основная сложность в реализации подобных проектов заключается в том, что работы должны производиться в сложных геологических условиях Санкт-Петербурга. Необходимость свести к минимуму осадки дневной поверхности становится главной задачей. Оптимальным решением при строительстве таких объектов является применение опережающей ограждающей крепи (экрана).

Конструктивным назначением экрана является предупреждение и минимизация деформаций и просадок поверхности, расположенной над сводом тоннеля в период его проходки и крепления.

Существуют различные модификации этого способа, отличающиеся материалом, формой и размерами экрана, способами возведения, наличием или отсутствием замковых элементов и др.

По типу защитные экраны подразделяют на:

- металлические экраны из труб;
- железобетонные экраны из труб;
- экраны из стабилизированного закрепленного грунта;
- экраны из опережающей бетонной крепи.

При устройстве экранов применяют следующие технологические способы:

- продавливание или прокол труб малого диаметра;
- горизонтальное бурение;
- нарезание (фрезерующим или баровым рабочим органом) щелей длиной до 3–4 м и высотой 12-20 см и более;
- щитовую проходку выработок малого диаметра;
- микротоннелирование.

Наибольшее распространение получили экраны из стальных труб, заполненных бетоном с арматурными каркасами.

Технология строительства выработок под защитой экрана из труб состоит из следующих основных этапов.

1. Проходка вспомогательной выработки (котлована или шахты), в которую устанавливается необходимое оборудование для создания экрана – буровые и домкратные установки.

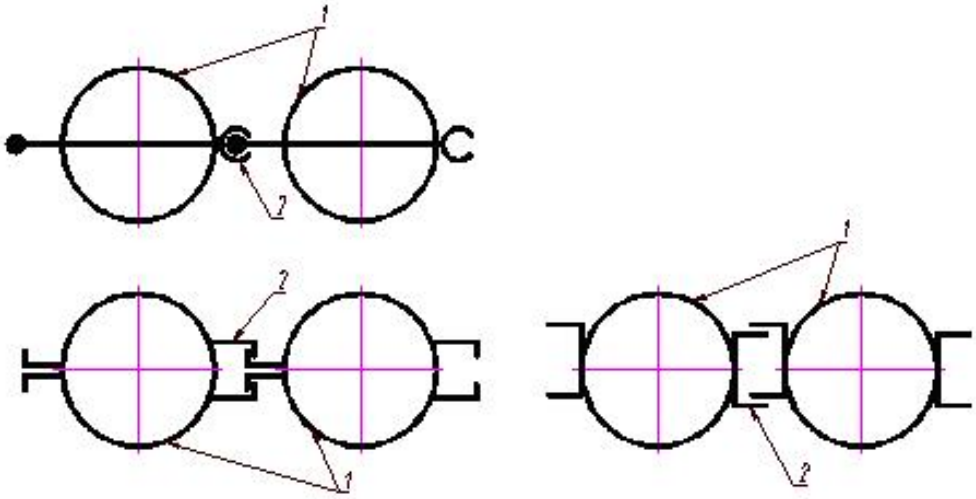


Рисунок 1. Способ соединения труб: 1 – трубы; 2 – замковые соединения

2. Устройство опережающей защитной крепи. Стальные трубы продавливают над перекрытием либо по всему периметру вдоль оси выработки. В устойчивых грунтах их располагают с зазорами 15–20 см. При продавливании труб в неустойчивых грунтах их соединяют между собой с помощью замковых устройств по типу шпунта (рис. 1). В этом случае достигается повышение точности задавливания и упрощается контроль, так как замковые устройства служат направляющими для вновь надавливаемых труб, сокращается поступление воды сквозь экран. После завершения работ по продавливанию трубы заполняют бетоном.

3. Разработка, погрузка и удаление грунта под защитой готового экрана. Выработку возводят с подкреплением экрана заходками, соответствующими шагу стальных арок.

4. Возведение постоянной крепи.

При сооружении небольших тоннелей мелкого заложения трубы экрана продавливаются на всю длину сооружения и располагаются параллельно направлению проходки. С обеих сторон экран чаще всего жестко заделан в припортальные стальные рамы либо железобетонные порталы. Технология проходки позволяет возводить выработки различных форм и сечений длиной до 80–100 м. Увеличение длины экранов может быть достигнуто сооружением промежуточных котлованов для задавливания (рис. 2).

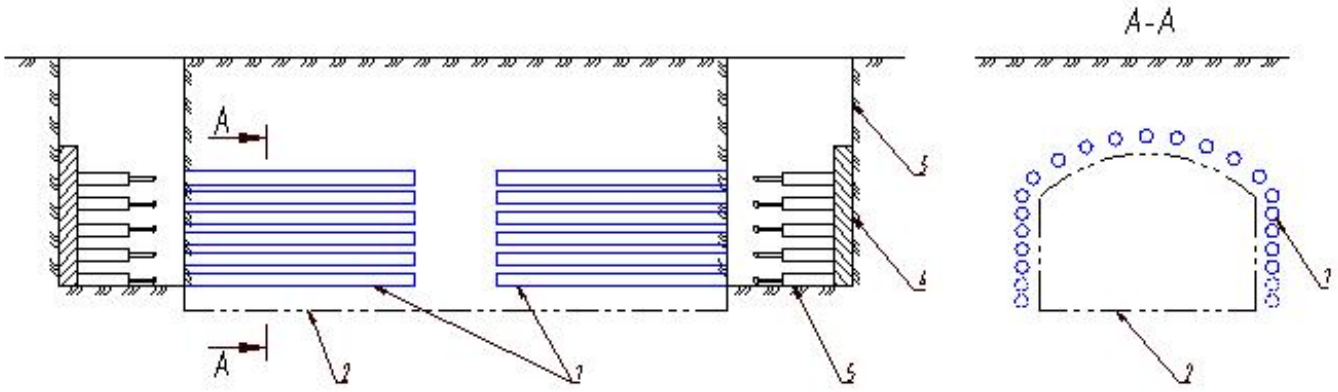


Рисунок 2. Схема экрана из труб: 1 – трубы; 2 – подземная выработка; 3 – котлован; 4 – упорная площадка; 5 – домкрат

Технология возведения опережающей крепи при строительстве сооружений глубокого заложения немного отличается от предыдущей. Опережающие экраны создаются непосредственно из забоя подземной выработки путем бурения наклонных (реже горизонтальных) скважин и задавливания в них труб. Скважины забуриваются под углом 4–6° к оси подземной выработки. Экраны устраивают секциями по 10–15 м с перекрытием соседних секций на 1–3 м. В таком случае труба с одной стороны опирается на упругоподатливую опору (раму временного крепления), а другим – на систему податливых опор, моделирующих ненарушенный грунт призабойной зоны.

Для продавливания труб и извлечения из них грунта, соединения звеньев труб, заполнения их бетоном применяют специализированное оборудование. Наибольшее применение получили механизированные установки для прокола, продавливания, горизонтального бурения, микротоннелирования, основанного на продавливании труб вслед за управляемым щитовым проходческим комплексом.

Одним из примеров применения защитных экранов из труб может служить автодорожный тоннель участка КАД в створе Токсовской ул., участок от Приозерского шоссе до автомобильной дороги «Россия».

Инженерный проект строительства участка автодорожного тоннеля в створе Токсовской улицы в зоне пересечения железнодорожных путей и КАД вокруг Санкт-Петербурга, сооружаемого «открытым» способом работ, разработан научно-исследовательским институтом ОАО «Ленметрогипротранс». Проект участка тоннеля, проходящего непосредственно под железнодорожными путями и сооружаемого «закрытым» способом работ, разработан ООО «Космос СПб».

Тоннель предусмотрен для организации четырехполосного автомобильного движения (по две полосы в каждом направлении) и пешеходного перехода через железнодорожные пути.

Тоннель расположен в плане в створе продлеваемой Токсовской улицы, пересекает пути Октябрьской железной дороги и проходит под эстакадой КАД. В состав тоннеля входит закрытый и рамповые участки. Длина рамповых участков ограничена существующими перекрестками, как со стороны города, так и со стороны области. Длина закрытой части – 184м, из которых 50,2м (непосредственно под нитками железнодорожных путей) сооружается горным способом.

При этом величина деформаций железнодорожных путей не должна превышать допустимых отклонений от норм содержания железнодорожных путей, согласно «Инструкции по текущему содержанию железнодорожного пути»: величина степеней отступления по ширине колеи не должна превышать по уширению +6 мм и по сужению – 4 мм (п. 2.2.2, табл. 2.3 [4]); величина отступления по уровню – 10 мм, перекосу – 12 мм, просадкам – 12 мм (п. 2.2.2, табл. 2.4.[4]).

Генеральным подрядчиком выступил ООО «Космос». В качестве субподрядной организации по строительству участка открытого способа работ – ОАО «Метрострой».

Инженерно-геологические условия строительства сложные. Тоннель по всей длине залегает в неустойчивых водонасыщенных грунтах (супесях, песках, суглинках). Было принято решение о сооружении тоннеля под защитой опережающей крепи из труб диаметром 1020 и 800 мм. Преимуществами такой технологии является возможность вести работы по строительству без перерыва железнодорожного движения и минимальное влияние тоннеля на железнодорожное полотно.

Экран из труб сооружался по всему периметру тоннеля методом микротоннелирования. В качестве основного оборудования применены тоннелепроходческие механизированные комплексы марки AVN (AVN-800, AVN-1000), разработанные и изготовленные фирмой HERRENKNECHT (Германия). Стальные трубы задавливались вслед за продвижением щита заходками по 6 м (по длине трубы). После сооружения экрана для придания жесткости конструкции были выполнены работы по устройству стальных портальных рам и бетонированию порталов (см. рис. 3). Для поддержания лба забоя в неустойчивых грунтах было выполнено инъецирование тела тоннеля цементным раствором по технологии «jet-grouting».

Рисунок 3. Вязка арматуры и монтаж опалубки для бетонирования порталов

Рисунок 4. Устройство накладок на экран из труб для гидроизоляции тоннеля

Разработка грунта подземной части велась по следующей технологии: при помощи экскаватора разрабатывалась пилотная разведочная штольня; далее производилась нарезка щелей с установкой временного крепления. Грунт разрабатывался заходками по 3 м с установкой металлических рам крепления из двутавровых балок.

Для снижения поступления воды в тоннель и нанесения гидроизоляции на экран из труб наваривались стальные накладки (рис. 4).

Суммарные осадки путей при сооружении тоннеля не превышали 12 мм.

Другой пример применения технологии опережающей крепи – расширение тоннельных переходов станции метро «Купчино» петербургского метрополитена (рис. 5).

Подземные пешеходные переходы у станции метро «Купчино» во Фрунзенском районе Санкт-Петербурга были построены в 1974 г. Они служили для пропуска пассажиров метрополитена и подземной железнодорожной станции «Купчино», а также для обеспечения связи между Московским и Фрунзенским районами, которые разделяют железнодорожные пути. Увеличение пассажиропотока вызвало необходимость расширения существующих подземных переходов.

Проектируемые пешеходные тоннели проходят вдоль существующих под двумя железнодорожными нитками Пушкинского направления на расстоянии 1,5 м от подошвы рельсов, в связи с чем требуется применение щадящих способов строительства.

Строительство предполагалось вести без перерыва железнодорожного движения и переноса путей. Инженерный проект строительства пешеходного тоннеля разработан институтом ГУП «Ленгипроинжпроект». Заказчик – ГУП «Мостотрест», генеральный подрядчик – ООО «ПИК».

Рисунок 5. Подземные пешеходные переходы на ст.м. «Купчино»

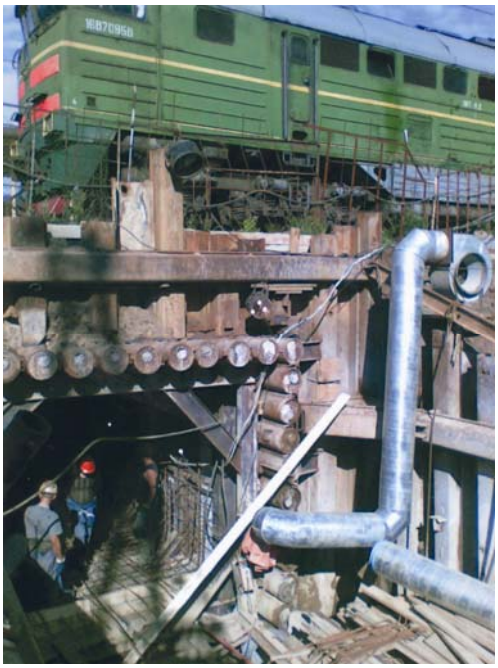


Рисунок 6. Сооружение пешеходного перехода

Для устройства экрана использовалась бурошнековая установка фирмы DitchWitch JT 4020, установленная в рабочем котловане. Стальные трубы диаметром 325 мм продавливались в грунт вслед за рабочим органом буровой установки при помощи домкратов на длину 19,7 м заходками по 1 м. Между собой соседние трубы соединены замковыми устройствами для повышения точности задавливания. Перед началом проходки тоннеля производилась обвертка экрана из труб с наружной и внутренней стороны рамами из двутавровых балок со стороны рабочего и приемного котлованов. Проходка тоннеля велась вручную уступным способом с отставанием забоя на одну заходку отбойными молотками под защитой рам из сдвоенных двутавров №24, установленных с шагом 1,6 м. Крепление лба забоя осуществлялось телескопическими трубами с забиркой из досок (см. рис. 6). Осадки путей составили 6–10мм.

Технология проходки под защитой экрана также широко используется при строительстве станционных тоннелей Петербургского метрополитена. Например, так строились станции Адмиралтейская и Звенигородская.

Опыт показывает, что применение технологии строительства тоннелей под защитой экрана из труб является возможным для условий г.Санкт-Петербурга. Технология безосадочная (осадки дневной поверхности не превышают допустимые) и позволяет вести строительство без остановки авто- и железнодорожного (как в приведенных примерах) движения, что важно в условиях нашего города. Также следует отметить небольшую стоимость строительства.

Литература

1. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов. М., 2004.
2. Рекомендации по применению опережающих экранов из труб при сооружении транспортных тоннелей. М., 1988.
3. СНиП 32-04-97 «Тоннели железнодорожные и автодорожные». М., 1997.
4. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. ЦП 774. М., , 2000.

**Ольга Михайловна Львова, Санкт-Петербург*

Тел. моб.: +7(905) 212-92-07; эл. почта: olgalvova@inbox.ru

Институт БелНИИС, г. Минск, Республика Беларусь

Институт БелНИИС был образован в 1957 г. как Институт строительства и Архитектуры (ИСиА), призванный комплексно решать градостроительные, архитектурно-строительные, теплофизические, акустические, технологические проблемы жилищного, промышленного и сельскохозяйственного строительства. С 1988 по 1991 год – Белорусский НИИ строительства НПТО «Белстройнаука», с 1991 года по настоящее время – Белорусский НИИ строительства Госстроя (с 1994 года – Минстройархитектуры) Республики Беларусь (БелНИИС).

Первым директором института, оказавшим большое влияние на его становление и развитие, укрепление научной базы, формирование кадров высокой квалификации, подготовку молодых специалистов, был С. С. Атаев.

В последующие годы на базе структурных подразделений ИСиА и проектных организаций были созданы БелНИИГрадостроительства, БелНИИГипроСельСтрой, БелНИИОУС. Затем на базе ИСиА и БелНИИОУС в 1988 г. создается Научно-проектно-техническое объединение «Белстройнаука» с переименованием ИСиА в БелНИИС. С 1991 г. после распада объединения БелНИИС снова получает юридическую самостоятельность с подчинением Госстрою Беларуси. В разные периоды институт возглавляли И. Ф. Войтович, Н. Н. Ермоленко, Г. Ф. Шуков, Н. П. Блещик, А. И. Мордич.

БелНИИС, сохраняя лучшие традиции ИСиА и развивая новые направления, в настоящее время выполняет многогранные комплексные исследования по широкому кругу проблем современного жилищно-гражданского и промышленного строительства.

Основным видом деятельности является проведение научно-исследовательских работ по следующим направлениям:

- технология бетона и растворов;
- технология сборного и монолитного бетона и железобетона, опалубочные системы;
- современные конструкции и технологии устройства фундаментов и инженерных коммуникаций;
- конструктивные системы зданий и сооружений, строительные конструкции;
- строительная акустика и вибрационная безопасность;
- современные системы отопления и тепловой защиты зданий;
- современные отделочные и теплоизоляционные материалы.

Также институт осуществляет экспериментальное проектирование зданий и сооружений, разработку нормативных документов, обследование существующих зданий и сооружений с оценкой их технического состояния и выдачей рекомендаций по их усилению и реконструкции, сертификационные испытания конструкций и строительных материалов. Особое место занимает подготовка научных кадров в аспирантуре.

На сегодняшний день большинство работ БелНИИС является составной частью важнейших государственных научно-технических программ и определяет приоритетные направления развития строительной науки Республики Беларусь. Достижения института регулярно представляются на республиканских и международных выставках.

С непосредственным участием института построена Национальная библиотека Белоруссии, Велотрек, Комплекс зданий площади независимости, Хоккейная арена к Чемпионату мира, а также множество жилых и общественных зданий как в Минске, так и по всей Белоруссии.

В 2007 году институт выступил организатором Международного симпозиума «Проблемы современного бетона и железобетона». Он имел большую популярность, поэтому уже в 2009 году был проведен второй такой форум.

В настоящее время институт возглавляет кандидат технических наук Михаил Филиппович Марковский.

Беседовал с М.Ф. Марковским И.А. Войлоков

Деформации усадки бетона, модифицированного химическими и тонкодисперсными минеральными наполнителями[1]

Аспирант, младший научный сотрудник Д.С. Котов*,
РУП «Институт БелНИИС»

Необходимость прогнозирования величины усадки бетона и железобетонных конструкций в последнее время приобретает все большее значение в связи с интенсивным развитием строительства зданий и сооружений из монолитных и сборно-монолитных железобетонных конструкций на основе бетонных смесей, модифицированных химическими модификаторами и тонкодисперсными минеральными наполнителями. Данная проблема рассматривалась многими исследователями, в том числе в работах [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Как показывают многолетние наблюдения за состоянием эксплуатирующихся конструкций, практически в любой монолитной железобетонной конструкции могут быть обнаружены трещины различных размеров, приводящие к снижению их долговечности [1]. В этой связи исследователи многих стран мира продолжают изучать влияние различных факторов на величину усадки бетона и железобетона и разрабатывать уточненные методики расчета их значений на стадии проектирования конструктивных систем зданий и сооружений.

Представленные в настоящей статье результаты исследований явились основой для уточнения нормативных значений усадки бетона, модифицированного химическими добавками и тонкодисперсными минеральными наполнителями, а также для совершенствования методик проектирования состава бетона с учетом прогнозируемых значений деформаций усадки.

Исследования выполнялись по заданию Минстройархитектуры Белоруссии по теме: «Провести исследования влияния содержания в бетоне арматуры, пластифицирующих, расширяющих и минеральных тонкодисперсных добавок на его физико-механические свойства, в том числе на собственные деформации, и разработать дополнение к СНБ 5.03.01-02 в части определения деформаций усадки и потерь предварительного напряжения в арматуре с рекомендациями с целью массового применения бетонов и растворов с компенсированной усадкой» (рег. № 20053269).

Предпосылки по уточнению методики расчета деформаций усадки

Анализ методов оценки деформаций усадки цементного камня и железобетона представлен в работах [2, 4, 9, 10, 11, 12, 13]. Из этого анализа можно сделать вывод о том, что пока нет единства во взглядах и в методах расчета усадки бетона и железобетона, причем как на стадии расчета железобетонных конструкций, так и на стадии проектирования состава бетона с заданными значениями усадки. В работах [9, 10] предложена методика расчета усадки бетона и железобетонных конструкций на основе учета структурно-технологических и физико-химических факторов, которая может быть использована при подборе состава бетона с заданными значениями усадки. В них показано, что деформации усадки бетона обуславливаются множеством факторов конструктивного и технологического характера. Однако предложенная методика требует наличия сведений о физико-химических свойствах цемента и использования сложной компьютерной техники. Для использования ее на стадии проектирования конструкций необходимы дополнительные упрощения с целью разработки инженерной методики. Данное допущение может иметь место и в связи с тем, что цементы, производимые в Республике Беларусь, имеют сходный минералогический состав. Как отмечается в [14], расчетная методика должна быть уточнена в связи с применением химических модификаторов и (или) тонкодисперсных минеральных наполнителей в бетонной смеси, что может в значительной степени изменять физико-механические характеристики бетона, такие как степень гидратации цемента, сроки схватывания, прочность в раннем возрасте и т.д., а, соответственно, и деформации усадки.

В EN 1992 – 2 – 1 [15] и, соответственно, в СНБ 5.03.01 – 02 [16] представлена инженерная методика расчета усадки бетона ε_{cs}, в которой ее величина рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cs,d} + \varepsilon_{cs,a}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{cs,d}$ – часть усадки бетона, обусловленная испарением из него влаги;

$\varepsilon_{cs,a}$ – часть усадки бетона, обусловленная процессами твердения бетона.

Величина усадки бетона $\varepsilon_{cs,d}$ определяется по формуле:

$$\varepsilon_{cs,d} = \beta_{ds} \cdot \varepsilon_{cs,d,\infty}, \quad (2)$$

[1] Исследования выполнены совместно с Н.С.Протько под руководством д.т.н., профессора Н.П. Блещика

где $\varepsilon_{cs,d,\infty}$ – предельные значения части усадки, которые допускается определять по таблице 6.3 [16];

β_{ds} – функция развития усадки бетона во времени, определяемая по формуле:

$$\beta_{ds} = \left[\frac{(t - t_s)/t_1}{350(h_0/h_1)^2 + (t - t_s)/t_1} \right]^{0,5}, \quad (3)$$

где t – возраст бетона, для которого рассчитывается величина части усадки, сут.;
t_s – возраст бетона к моменту окончания влажного хранения бетона, сут.;

$h_0 = \frac{2A_c}{u}$;

A_c, u – соответственно, площадь и периметр поперечного сечения элемента, мм;
$h_1 = 100$ *мм*;
$t_1 = 1$ *сут.*

Предельные значения части усадки бетона $\varepsilon_{cs,d,\infty}$, приведенные в таблице 6.3 [16], применимы для бетонных смесей с марками по удобоукладываемости П2 и П3. Для бетонных смесей, имеющих другие марки по удобоукладываемости, значения $\varepsilon_{cs,d,\infty}$, принятые по таблице 6.3 [16], следует умножать на поправочные коэффициенты, равные:

- при П1, СЖ1-СЖ3, Ж1-Ж4 – 0,70;
- при П4, П5 – 1,20.

При определении промежуточных значений части усадки бетона $\varepsilon_{cs,d,\infty}$ по таблице 6.3 [16] допускается линейная интерполяция.

Величину части усадки бетона $\varepsilon_{cs,a}$ следует определять по формуле:

$$\varepsilon_{cs,a} = \beta_{as} \cdot \varepsilon_{cs,a,\infty}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{cs,a,\infty} = -2,5 \cdot (f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \le 0$; (5)

$\beta_{as} = 1 - \exp \cdot (-0,2\, t^{0,5})$; (6)

t – время, сут.

Из приведенных формул и таблиц следует, что основными факторами, обуславливающими величину усадки бетона, являются: класс бетона по прочности на сжатие, относительная влажность окружающей среды, геометрические размеры конструкций, а удобоукладываемость бетонной смеси учитывается грубо, в зависимости от жесткости или осадки стандартного конуса.

Методика, предложенная в DIN EN 1992-1-1 [17], по сути, аналогична [15] и [16] с видоизменением функции β_{ds}, определяемой как:

$$\beta_{ds} = \frac{(t - t_s)}{0,04 \cdot \sqrt{h_0^3} + (t - t_s)}, \quad (7)$$

где все входящие величины приняты в соответствии с (3).

Отклонения расчетных значений, рассчитанных согласно методике [16], от фактических экспериментальных данных, приведенных далее, представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, разброс составляет от плюс 300% до минус 50%, что не может считаться удовлетворительным.

При этом не учитываются такие важные факторы, как вид цемента (его минералогический состав и удельная поверхность, обуславливающие кинетику набора прочности бетона); наличие химических модификаторов и тонкодисперсного минерального наполнителя; влияние литых и самоуплотняющихся бетонных смесей, удобоукладываемость которых определяется расплывом стандартного конуса.

Возможность учета указанных факторов при расчете усадки бетона на стадии проектирования конструкций может быть реализована путем уточнения коэффициентов $\alpha_{ds.1}$ и $\alpha_{ds.2}$ Приложения Б [16], входящих в зависимости, определяющие предельные значения части усадки бетона $\varepsilon_{cs.d.\infty}$. При этом

зависимости (4)–(6), определяющие незначительную величину части усадки бетона $\varepsilon_{cs.a}$, могут быть оставлены в прежнем виде.

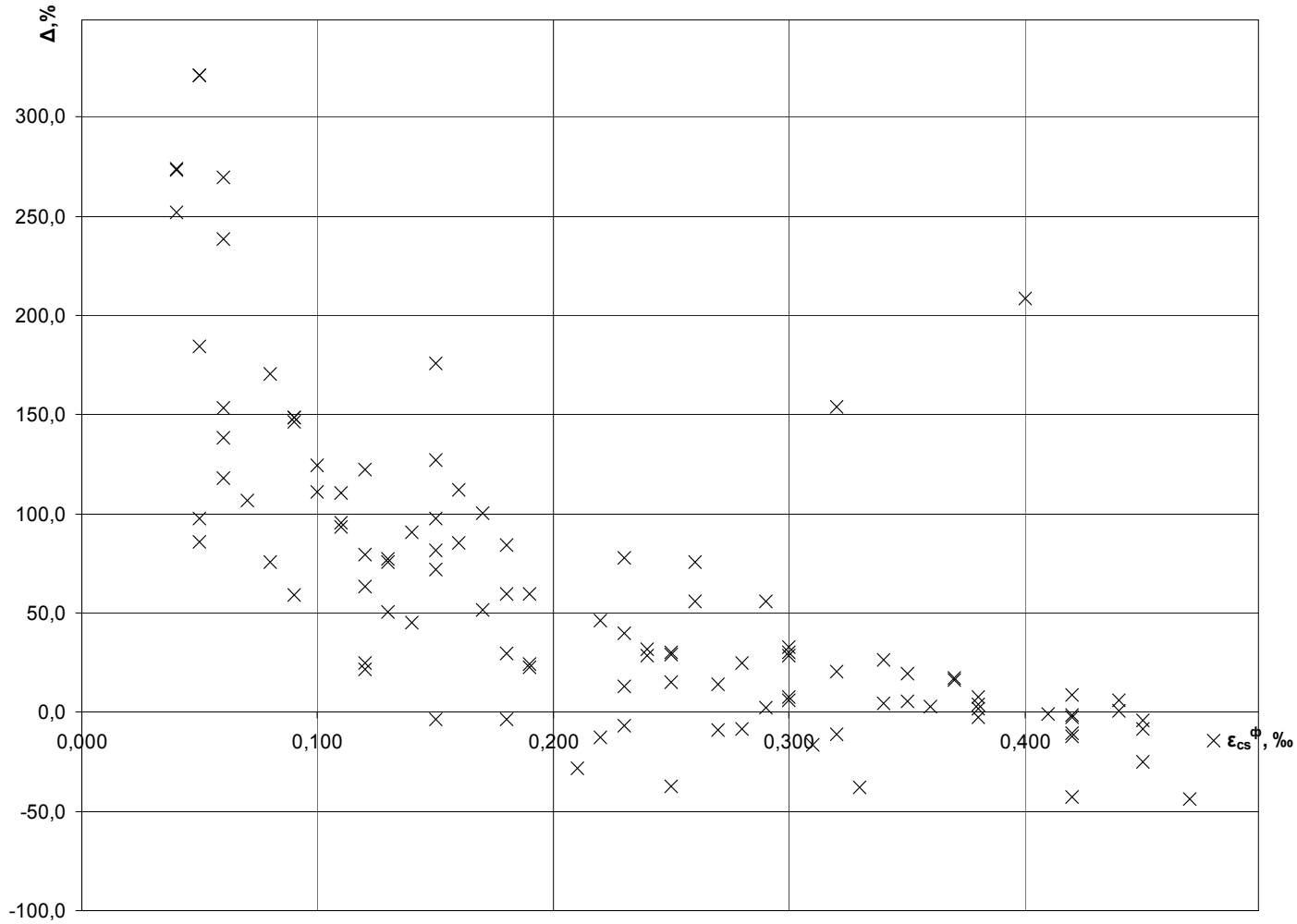


Рисунок 1. Отклонения расчетных значений усадки бетона от опытных данных

Значения коэффициентов $\alpha_{ds.1}$ и $\alpha_{ds.2}$ могут быть получены на основе результатов экспериментальных исследований и зависимостей (Б.11 – Б.14) Приложения Б [16]:

$$\varepsilon_{cs.d.\infty} = \left[\left(220 + 110\alpha_{ds.1}\right) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds.2} \frac{f_{cm}}{f_{cm.o}} \right) \right] \cdot 10^6 \cdot \beta_{RH}, \text{ (Б.11)}$$

где f_{cm} – средняя прочность бетона в возрасте 28 суток, МПа;

$f_{cm.o}$ = 10 МПа;

$\alpha_{ds.1}, \alpha_{ds.2}$ – коэффициенты, учитывающие вид цемента и принимаемые по таблице Б.1;

$$\beta_{RH} = -1{,}55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \text{ при RH < 99 \% } \beta_{sl}; \text{ (Б.12)}$$

$\beta_{RH} = 0{,}25$ при $RH \geq 99\ \%\ \beta_{sl}$; (Б.13)

$$\beta_{sl} = \left(\frac{3{,}5 f_{cm.o}}{f_{cm}} \right)^{0{,}1}; \text{ (Б.14)}$$

$RH_0 = 100\ \%$.

$$\alpha_{ds.1}=\left[\frac{\varepsilon_{cs.d.\infty}\cdot 10^6}{\beta_{RH}\exp\left(-\alpha_{d.s.2}\dfrac{f_{cm}}{f_{cm.o}}\right)}-220\right]\cdot\frac{1}{110}. \quad (8)$$

Таблица Б.1. Значения коэффициентов $\alpha_{ds.1}$, $\alpha_{ds.2}$

Вид цемента	$\alpha_{ds.1}$	$\alpha_{ds.2}$
Медленно твердеющий	3,0	0,13
Нормально и быстротвердеющий	4,0	0,11
Быстротвердеющий высокопрочный	6,0	0,12

Значение $\alpha_{ds.2}$ изменяется в соответствии с данными таблицы Б.1 в незначительных пределах (от 0,11 до 0,13) и может быть принято равным средней величине 0,12.

В соответствии с зависимостями (1) и (2) значение $\varepsilon_{cs.d.\infty}$ должно вычисляться по формуле:

$$\varepsilon_{cs.d.\infty}=\frac{\varepsilon_{cs}^{on}-\varepsilon_{cs.a}}{\beta_{ds}\cdot k}, \quad (9)$$

где ε_{cs}^{on} – опытное значение относительных деформаций усадки бетона в возрасте 28 сут;

$\varepsilon_{cs.a}$ – значение части усадки бетона, вычисляемое по формулам (4)–(6) при t = 28 суток и f_{ck}, определяемом по формуле:

$$f_{ck}=f_{c.cube}^{on}\cdot 0{,}8; \quad (10)$$

β_{ds} – функция, вычисляемая по зависимости (3) при t = 28 сут;

k – значение коэффициента, применяемого в зависимости от удобоукладываемости опытной бетонной смеси. Для литых и самоуплотняющихся смесей значения k при предварительных расчетах следует принимать равным 1,2.

Характеристика материалов и методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились с использованием следующих материалов:

- цемент ПЦ 500-Д0 производства ОАО «Красносельскстройматериалы», $K_{нг}=0{,}27$;
- пластификаторы: суперпластификатор СМ-1 (ТУ BY100138369.466-2006), гиперпластификаторы ГП-1 (ТУ BY 100230600.447-2006), Stachement 2000-М Ж30 (St-2000) (ТУ BY 800013176.545-2007);
- минеральная добавка – тонкодисперсный доломит, выпускаемый ОАО «Доломит» по ГОСТ 16557-78 «Минеральный порошок для асфальтобетонных смесей. Технические условия», $S_{уд.д}=50,\ 200$ и $450 м^2/кг$;
- мелкий заполнитель – песок карьера «Волма» Минского района с $M_{кр}=2{,}69$, $S_{уд}=8{,}1 м^2/кг$;
- крупный заполнитель – гранитный щебень ПРУП «Гранит» с межзерновой пустотностью ($m_{п.кр}$) 0,37, удельной поверхность $S_{уд.кр}=0{,}365\ м^2/кг$;
- питьевая вода, соответствующая требованиям СТБ 1114.

Для нахождения значений $\alpha_{ds.1}$ были проведены экспериментальные исследования деформаций усадки бетона, модифицированного различными химическими добавками, и содержащего минеральные тонкодисперсные наполнители. Выдерживание бетона производилось в средах минимум с двумя значениями относительной влажности. Удобоукладываемость бетонной смеси варьировалась в широких пределах – от жесткости до расплыва конуса. Варьировалась и средняя прочность бетона (класс бетона по прочности на сжатие).

Водовяжущее отношение варьировалось в пределах 0,32–0,55.

Содержание тонкодисперсного наполнителя принималось в количестве 20–40% от общей массы цемента и наполнителя.

Относительное содержание и вид пластификаторов принимались следующими: 0,2–0,4% для ГП-1; 0,6-1% для СМ-1 и 0,17–0,23% для St-2000 от массы вяжущего (цемент + наполнитель), в расчете на сухое вещество.

При определении усадки бетона использовались образцы-призмы с размерами 70×70×225мм.

Образцы-призмы изготавливались в одногнездовых металлических формах. Уплотнение бетонных смесей в формах осуществлялось в зависимости от их подвижности. Заформованные образцы до распалубки выдерживались 1 сутки в формах при температуре $20 \pm 2\,°C$. После распалубки, но не позднее 2 часов со времени распалубки, образцы устанавливались в камеру нормально-влажностного твердения с температурой $20 \pm 2\,°C$ и влажностью $90 \pm 5\%$, и камеру с температурой $20 \pm 2\,°C$ и влажностью, соответствующей экспериментальной ($40 \pm 5\%$, $60 \pm 5\%$ и $75 \pm 5\%$).

Определение изменений линейных деформаций образцов осуществлялось с помощью индикаторной стойки, состоящей из стойки для крепления индикатора и индикатора часового типа с ценой деления 1×10^{-3} мм. За базу измерений принимался стальной эталон длиной 225 мм.

Каждая серия образцов, на которых производился контроль усадки в возрасте 2, 3, 7, 14 и 28 суток, содержала по 2 образца-призмы для каждого из 2 условий.

Результаты исследований

Полученные значения деформации усадки бетонов экспериментальных составов представлены на рисунках 2–5.

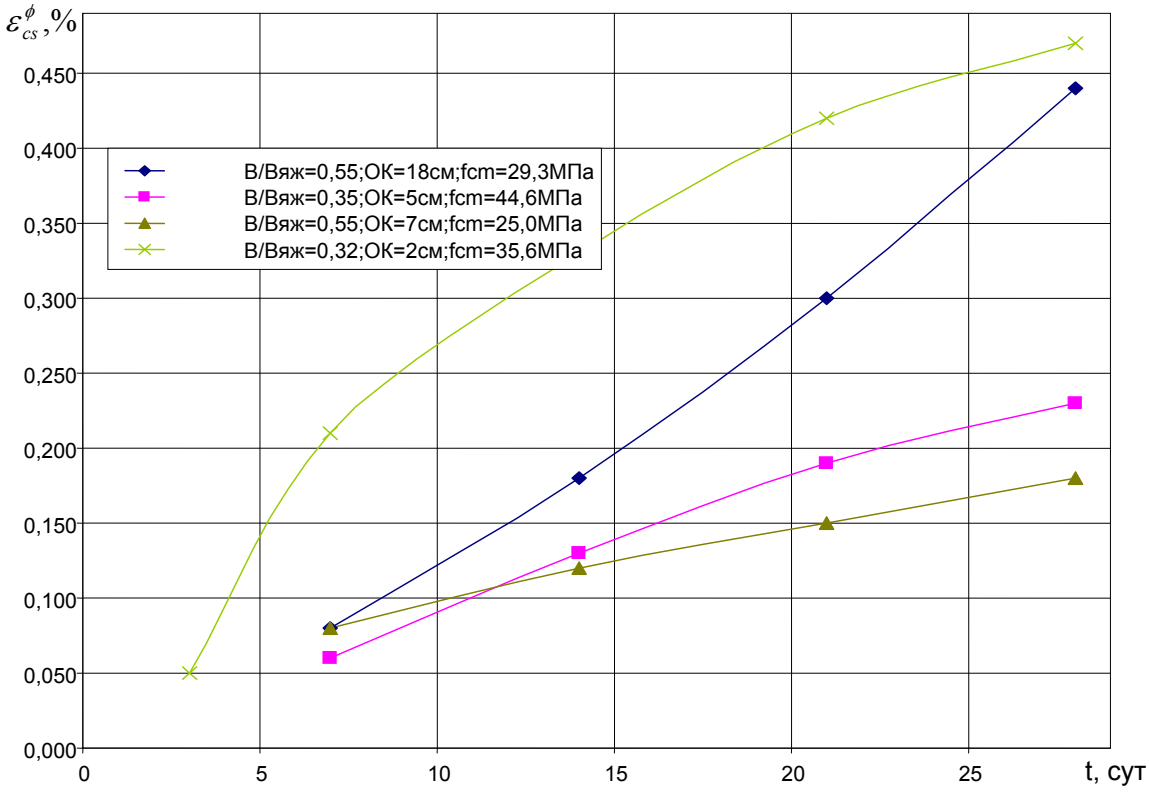


Рисунок 2. Опытные значения деформации усадки экспериментальных составов без химических модификаторов выдерживаемых при RH=60 и 75%

Предварительно в качестве среднего может быть принято значение $\alpha_{ds.1}$, представленное в таблице Б.1 [16] для нормально- и быстротвердеющего цемента, равное 4. Это значение изменяется в зависимости от удобоукладываемости бетонной смеси, применяемых тонкодисперсных наполнителей и вида химических добавок в широких пределах (от 2 до 7).

Анализ полученных данных показал, что коэффициент $\alpha_{ds.1}$ увеличивается при увеличении показателей удобоукладываемости бетонной смеси и уменьшается при увеличении содержания тонкодисперсных наполнителей и введении в состав бетона химических добавок. Причем наибольшее снижение коэффициента $\alpha_{ds.1}$ достигается при введении гиперспластификаторов.

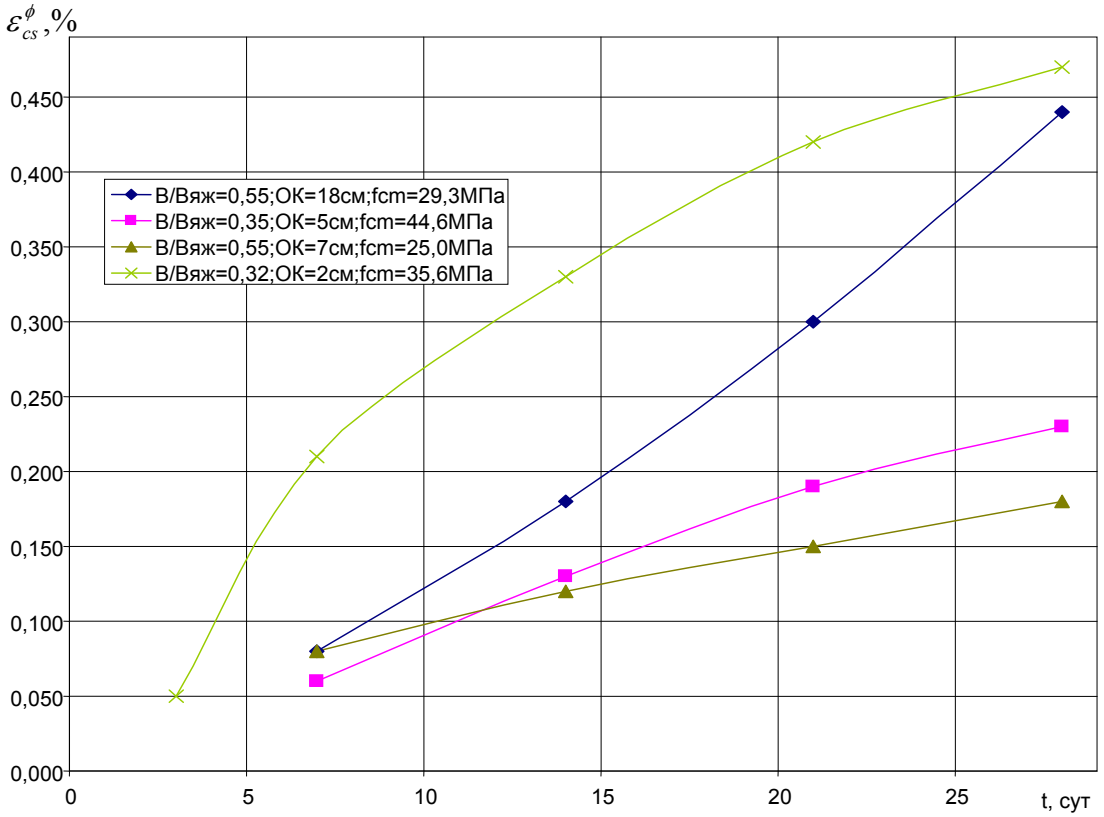


Рисунок 3. Опытные значения деформации усадки экспериментальных составов модифицированных добавками С-3 или СМ-1 выдерживаемых при RH=60 и 75%

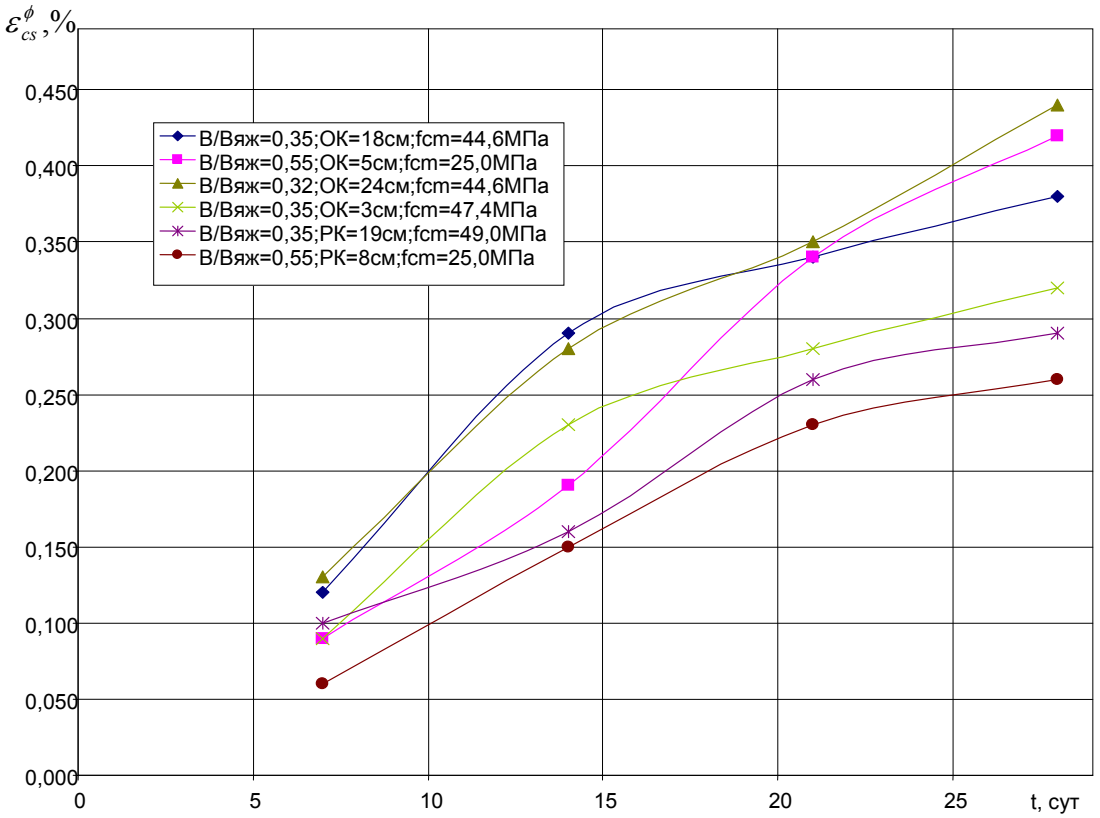


Рисунок 4. Опытные значения деформации усадки экспериментальных составов модифицированных добавками ГП-1 или St-2000 выдерживаемых при RH=60 и 75%

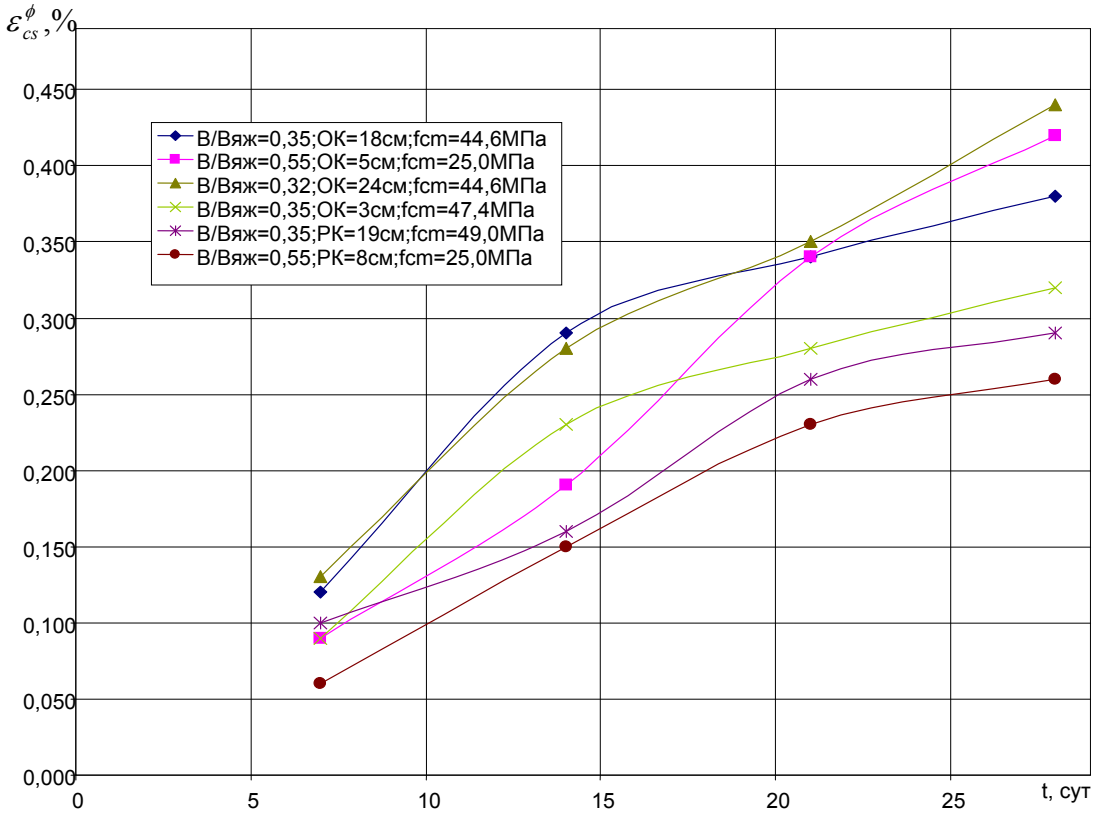


Рисунок 5. Опытные значения деформации усадки экспериментальных составов модифицированных различными добавками выдерживаемых при RH=40%

В результате математико-статистической обработки экспериментальных данных предложено принять следующий вид функции $\varepsilon_{cs.d}$:

$$\varepsilon_{cs.d} = k \cdot \beta_{ds} \cdot \varepsilon_{cs.d.\infty}, \quad (11)$$

а функция $\varepsilon_{cs.d.\infty}$ должна быть записана в виде:

$$\varepsilon_{cs.d.\infty} = \left[(220 + 110\alpha_{ds.1.м}) \cdot \exp\left(-\alpha_{ds.2} \frac{f_{cm}}{f_{cm.o}} \right) \right] \cdot 10^6 \cdot \beta_{RH}, \quad (12)$$

где *k* – коэффициент, учитывающий влияние марок по удобоукладываемости бетонной смеси, представленный в таблице 1;

β_{ds} – функция развития усадки бетона во времени, определяемая по формуле (3);

$\alpha_{ds.1.м}$ – коэффициент для бетонов, модифицированных химическими добавками, – должен определяться путем умножения коэффициента $\alpha_{ds.1}$ на коэффициент $k_м$, который следует принимать равным значениям, представленным в таблице 2. Значения коэффициента $\alpha_{ds.1}$ в зависимости от вида цемента следует принимать по данным таблицы 3.

Таблица 1. Значения коэффициента «k»

Марки по удобоукладываемости бетонной смеси	Коэффициент *k*
СЖ1, СЖ2, СЖ3, Ж2, Ж3, Ж4	0,7
Ж1, П1, П2	0,8
П3	1
П4,П5,РК-1,РК-2	1,2
РК-3, РК-4, РК-5 (SF-1), РК-6 (SF-2), РК-6 (SF-3)	1,3

Таблица 2. Значения коэффициента $k_м$

Вид химических модификаторов	Коэффициент $k_м$
Пластифицирующие добавки второй и третьей групп по СТБ 1112	0,90
Пластифицирующие добавки первой группы по СТБ 1112	0,85
Гиперпластификаторы (ГП – 1, St – 2000 и др.)	0,75
Ускорители твердения	1,1

Таблица 3. Значения коэффициента $\alpha_{ds.1}$

Вид цемента	Коэффициент $\alpha_{ds.1}$
Быстротвердеющий портландцемент и ПЦ 550 – Д0 (по ГОСТ 10178)	5,0
Нормальнотвердеющий портландцемент: ПЦ 500 – Д0 (по ГОСТ 10178); ЦЕМ –I класса по прочности на сжатие 42,5 (по ГОСТ 31108)	4,0
Нормальнотвердеющий портландцемент: ПЦ 500 – Д20 (по ГОСТ 10178); ЦЕМ –II класса по прочности на сжатие 42,5 (по ГОСТ 31108)	3,5
Нормальнотвердеющий портландцемент: ПЦ 400 – Д20, шлакопортландцемент, (по ГОСТ 10178); ЦЕМ –II класса по прочности на сжатие 32,5, ЦЕМ –III (по ГОСТ 31108)	3,0

В соответствии с полученными значениями коэффициентов $\alpha_{ds.1}$, $k_м$ и k были рассчитаны новые значения деформации усадки бетона, которые в сопоставлении с фактическими значениями деформаций усадки представлены на рис. 6.

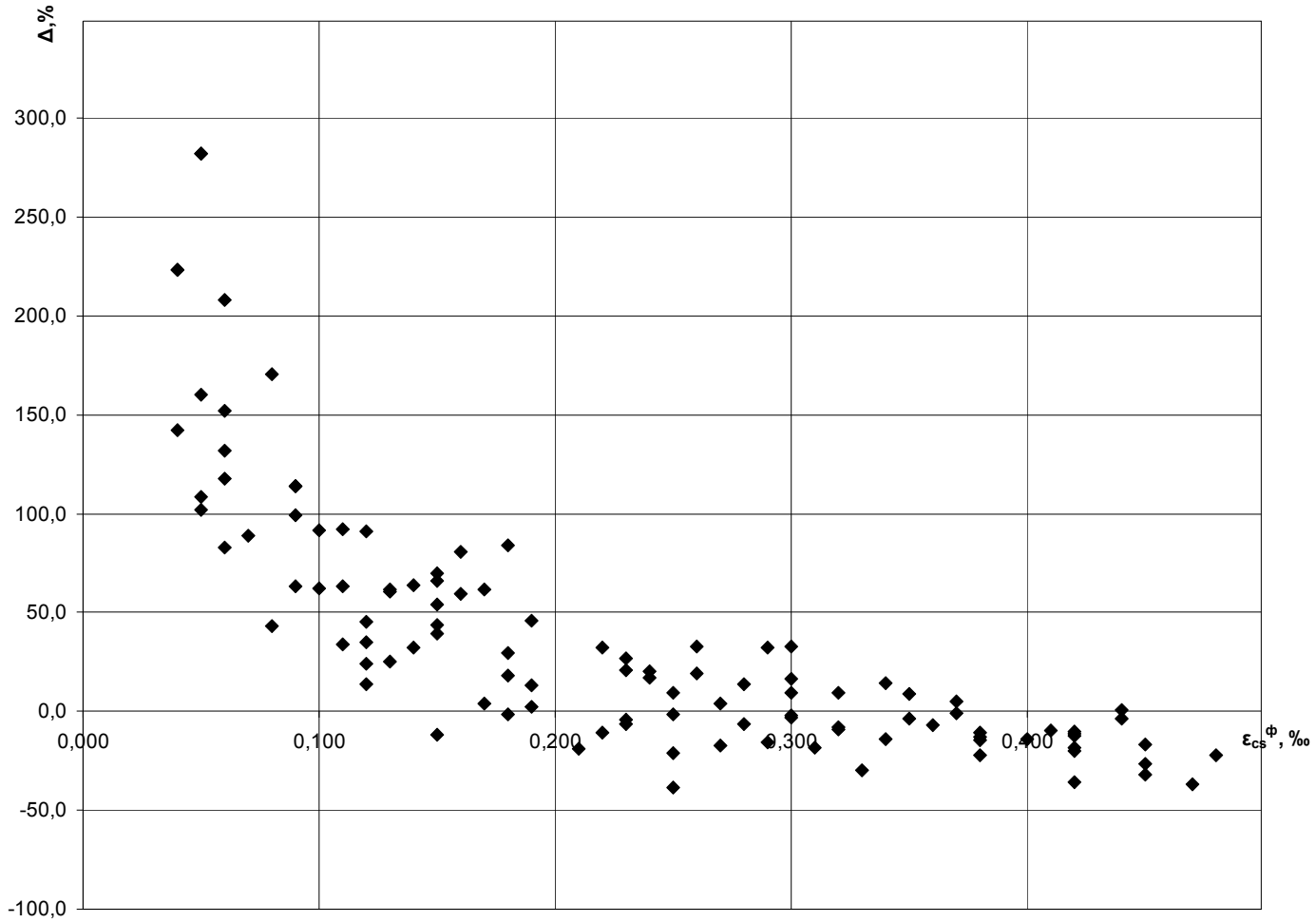


Рисунок 6. Отклонения расчетных значений усадки бетона от опытных данных

Представленные данные показывают удовлетворительные отклонения для образцов в возрасте 28 суток (в пределах ±30%). Однако отклонения в более раннем возрасте (2-21-е сутки) составили от плюс 250% до минус 40%, что не может считаться удовлетворительным.

Очевидно, что возможность снижения разброса отклонений деформаций усадки в раннем возрасте связана с необходимостью уточнения функции β_{ds}, описывающей развитие усадки во времени.

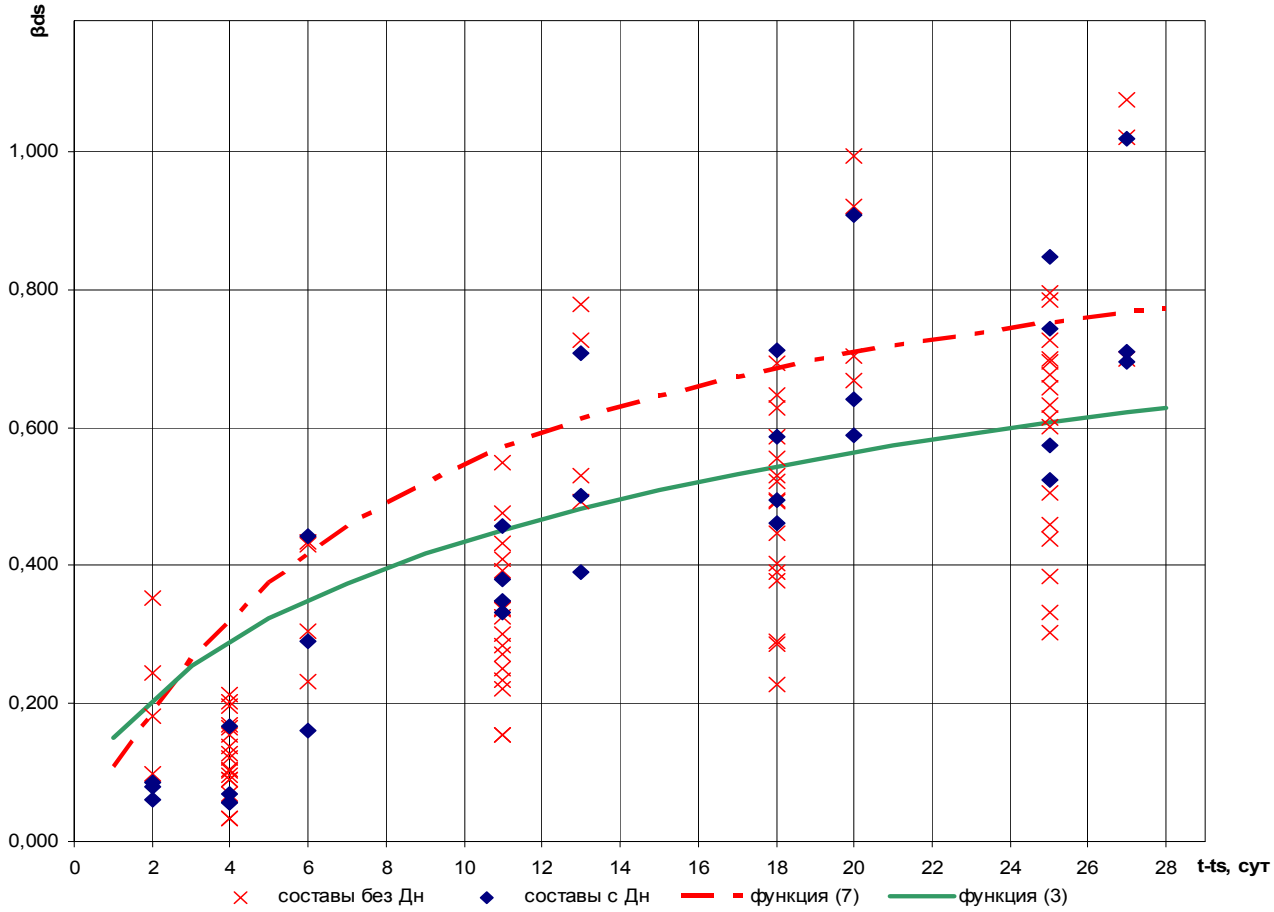


Рисунок 7. Соотношения опытных значений функции β_{ds} по (13) и значений по (3) и (7)

На рис. 7 представлены значения $\beta_{ds,i}$ для опытных значений деформаций усадки, рассчитанных согласно (13).

$$\beta_{ds,i}^{\hat{i}\tilde{i}} = \frac{\varepsilon_{cs,i}^{\hat{i}\tilde{i}} - \varepsilon_{cs.a,i}}{k_i \cdot \varepsilon_{cs.d.\infty,i}}, \quad (13)$$

где $\varepsilon_{cs,i}^{\hat{i}\tilde{i}}$ – опытное значение относительных деформаций усадки бетона в различном возрасте;

$\varepsilon_{cs.\grave{a},i}$ – часть усадки бетона, обусловленная процессами твердения бетона, вычисляемая по формулам (4)–(6);

$\varepsilon_{cs.d.\infty,i}$ – предельные значения части усадки, определяемые по (12);

k – коэффициент, учитывающий влияние марок по удобоукладываемости бетонной смеси, представленный в таблице 1.

В результате математико-статистической обработки экспериментальных данных предложено принять следующий вид функции β_{ds} для составов бетона без тонкодисперсного минерального наполнителя:

$$\beta_{ds} = \left[\frac{(t - t_s)}{0{,}04 \cdot \sqrt{h_0^3} + (t - t_s)} \right]^{1.8}, \quad (14)$$

где все входящие величины приняты в соответствии с (3).

В случае применения тонкомолотого минерального наполнителя, в количестве от 10 до 30% от массы вяжущего, значение функции β_{ds} следует определять путем умножения значения β_{ds}, полученного по формуле (14), на коэффициент $K_{Дн}$ =1,1.

С учетом (11), (12) и (14) был произведен перерасчет новых значений деформаций усадки для всех экспериментальных составов. Отклонения расчетных величин от опытных представлены на рис. 8.

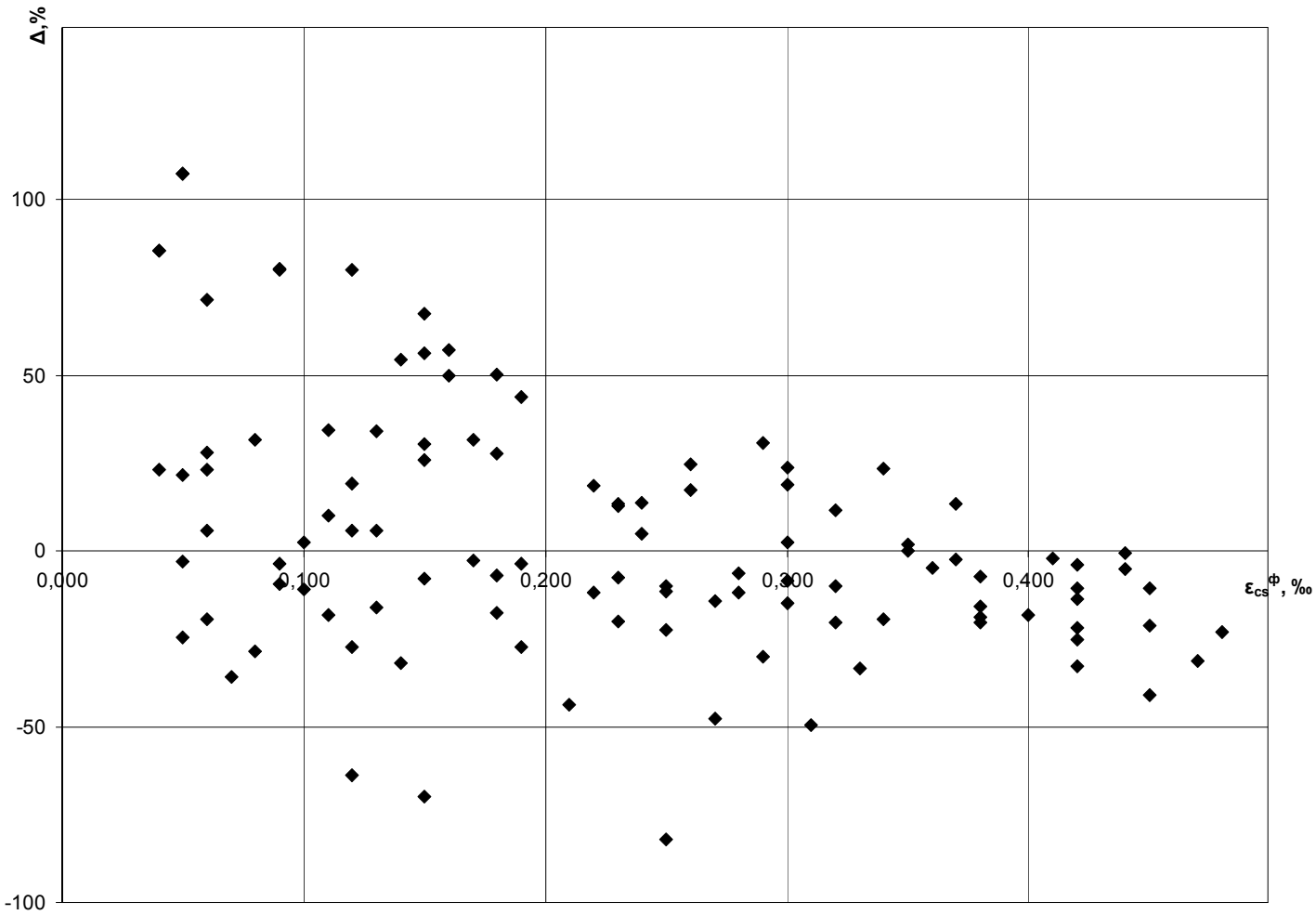


Рисунок 8. Отклонения расчетных значений усадки бетона от опытных данных

Выводы

1. Представлены результаты комплекса экспериментально-теоретических исследований, позволивших установить основные закономерности усадки бетона, модифицированного химическими модификаторами и тонкодисперсным наполнителем.

2. Результаты экспериментальных исследований усадки бетона в возрасте 28-ми суток, модифицированного химическими модификаторами и тонкодисперсным минеральным наполнителем, позволили установить, что она зависит от минералогического состава цемента, его плотности и удельной поверхности, начального водовяжущего отношения, вида и содержания пластификатора и тонкомолотого минерального наполнителя.

3. Математическая модель усадки бетона представлена в виде уточненной модели, предложенной в [16] и [17], скорректированной в области определения части усадочных деформаций, обусловленных испарением влаги при твердении бетона. Статистические характеристики адекватности расчетных и фактических значений усадки бетона свидетельствуют об их удовлетворительной сходимости и о возможности применения полученных коэффициентов при прогнозировании усадки бетонов, модифицированных химическими и тонкомолотыми минеральными наполнителями.

4. Результаты экспериментально-теоретических исследований могут быть также использованы при дальнейшем развитии основных положений технологии модифицированного бетона, являющегося наиболее перспективным для современных конструктивных систем зданий и сооружений, и назначения более достоверных нормативных значений усадки бетона.

Литература

1. Тур В.В. Экспериментально-теоретические основы предварительного на-пряжения конструкций при применении напрягающего бетона. Брест, 1998.
2. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси, 1963.
3. Александровский С.В. Расчет бетонных и железобетонных конструкций на изменение температуры и влажности с учетом ползучести. М: 1973.
4. Берг О.Я. Высокопрочный бетон / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.Н. Писанко. М.,1971.
5. Десов А.Е. Некоторые вопросы теории усадки бетона // Ползучесть и усадка бетона и железобетонных конструкций. М., 1973.
6. Улицкий И.И. Определение величин деформаций ползучести и усадки бетонов. Киев, 1963.
7. Voellmy A. Influence du temps sur la deformation du beton // Rizem Bulletin, №9, 1960.
8. Leviant i Einfluss der Betonzusammen-setzung auf daz Swinder // Betonzustein-Zeitung, №30, 1964.
9. Блещик Н.П. К построению расчетной модели усадки цементного камня с позиций физико-химической механики дисперсных систем / Н.П. Блещик, А.Н.Рак, М.Н. Рыскин // Вестник БГТУ, Строительство и архитектура, Приложение – Материалы XI Международного научно – методического семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», часть 2. Брест, 2004. С. 81 – 93.
10. Блещик Н.П. Расчетные модели усадки бетонных и железобетонных конструкций / Н.П. Блещик, А.Н. Рак, М.Н. Рыскин // Вестник БГТУ, Строительство и архитектура, Приложение – Материалы XI Международного научно – методического семинара «Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь», часть 2. Брест, 2004. С. 93 – 103.
11. Некрасов В.В. Изменение объема системы при твердении гидравлических вяжущих. ОТН, – 1945. – №6.
12. Холмянский М.М. Бетон и железобетон. Деформативность и прочность. М.,1997.
13. Шейкин А.Е. Структура и свойства цементных бетонов / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. М., 1979.
14. Исследовать реологические, структурные, физико-механические и технологические свойства самоуплотняющихся бетонов, обеспечивающие увеличение производительности труда при укладке бетонной смеси, снижение удельных затрат энергии и стоимости отделочных работ. Разработать и внедрить комплект нормативно-технической документации. Этап 7.06.02. Исследовать физико-механические свойства самоуплотняющихся бетонов: отчет о НИР (промежуточный) / Бел НИИС; рук. Н.П. Блещик. №ГР 20053269. Минск, 2006.
15. EN 1992-2-1, Eurocodez «Desing of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Building» – Commition of European Communities, Des 1991. P. 253.
16. Национальный комплекс нормативно-технических документов в строительстве. Строительные нормы Республики Беларусь. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01-02.-Введ. 01.07.2003.-Минск, 2002.
17. DIN EN 1992-1-1:2005-10, Eurocodez «Desing of concrete structures. Part 1: General Rules and Rules for Building» – Commition of European Communities, 2005. P. 248.

** Дмитрий Святославович Котов, г. Минск*

Тел. раб.: 8(10-375-17) 267-10-01, эл. почта: info@belniis.by

Бетонные отопительные приборы

Ведущий инженер-конструктор А.А. Фролов*,
РУП «Институт БелНИИС»

В настоящее время в связи с развитием технической базы разрабатываются более эффективные отопительные приборы, улучшаются их экологические характеристики. Большое значение придается тому, чтобы содержать эти устройства и системы на высоком техническом уровне и обеспечивать удобство обслуживания.

Разработка и конструктивное исполнение отопительных приборов должно рассматриваться не только с точки зрения законодательных предписаний и технических требований, но и с точки зрения пользователя. Должны приниматься во внимание энерго-экономические и экологические требования. Таким образом, перед конструкторами стоит задача создания отопительных систем с позиции теплопотребления, изменения термического сопротивления ограждающих конструкций, выбора поверхности нагрева, расчета оптимальных размеров, а также выбора соответствующих частей системы: отопительных приборов, арматуры, насосов и т.д.

Объём строительства жилья в Республике Беларусь увеличивается с каждым годом, однако его стоимость на сегодняшний день не всегда удовлетворяет потребителя. Определенная доля себестоимости квадратного метра жилья приходится на отопительные приборы (как один из основных элементов системы отопления). Снизив стоимость отопительного оборудования при сохранении необходимой теплоотдающей способности, можно добиться снижения стоимости жилья.

На сегодняшний день в Республике Беларусь освоен выпуск отопительных приборов из стали и алюминия, биметаллических отопительных приборов, а также продолжается выпуск усовершенствованных чугунных радиаторов. Кроме того, значительная доля рынка приходится на ввозную продукцию, что должно повлиять на развитее отечественного производителя по пути импортозамещения. Производство указанных отопительных приборов сопряжено со значительными затратами энергии, а в случае выпуска чугунных радиаторов наносится серьезный вред окружающей среде.

Альтернативой традиционным радиаторам и конвекторам могут стать бетонные отопительные приборы. Бетон является прекрасным строительным материалом, позволяющим использовать его для изготовления почти всех элементов зданий, в том числе отопительных устройств – нагревательных приборов, выполненных в виде тонких плит.

Теоретическое исследование бетонных отопительных приборов

Поскольку экономическая эффективность нагревательного прибора в основном определяется расходом металла на единицу отдаваемого им тепла, для изготовления трубных нагревательных элементов бетонных приборов целесообразно применять трубы малых сечений с тонкими стенками, имеющие малый вес.

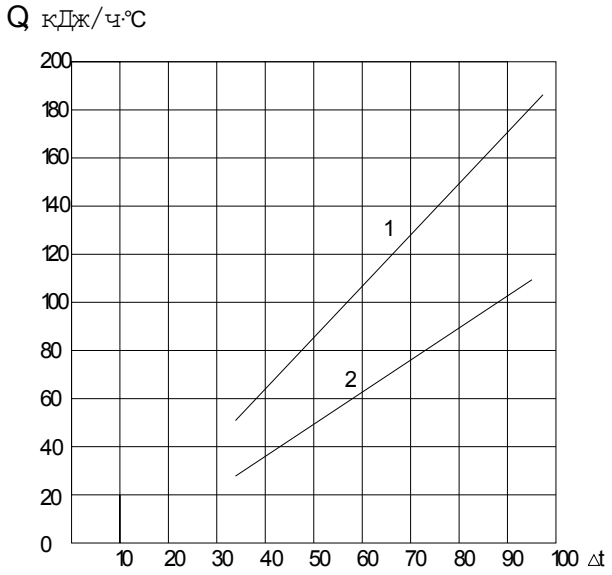


Рисунок 1. График теплоотдачи 1 м трубы (теплоноситель – вода)

Исследования показали, что теплоотдача с 1 кг металла газовых труб, заложенных в бетонные приборы с двусторонней теплоотдачей, достигает 3,8 кДж/кг·час·град, а для радиаторов – всего 1 кДж/кг·час·град. Таким образом, при применении бетонных отопительных приборов можно сократить расход металла в среднем в 4 раза по сравнению с чугунными приборами, работающими в одинаковых условиях [1].

В отопительном приборе бетон является тепловой изоляцией, у которой теплопроводность велика, а термическое сопротивление теплоотдаче низкое. Поэтому важно рационально решить задачу конструктивных особенностей трубных нагревательных элементов и их размещение в бетоне на основе учета законов передачи тепла от замоноличенных труб к поверхности прибора.

На рис. 1 показан график теплоотдачи 1 м трубы Ø3/4″, где в качестве теплоносителя использовалась вода.

Прямая 1 графика характеризует теплоотдачу трубы, замоноличенной в бетоне, а прямая 2 – теплоотдачу оголенной трубы. При стандартном перепаде температур в 70ºС теплоотдача замоноличенной трубы на 60% больше, чем неизолированной трубы того же диаметра [1].

Для бетонных нагревательных приборов можно применять теплоноситель с высокими параметрами, поскольку температура их поверхности устанавливается на 25-30ºС ниже температуры теплоносителя. Это обстоятельство позволяет еще более значительно снизить расход металла на нагревательные элементы.

При проведении теплотехнических испытаний при температуре теплоносителя до 90ºС температура на поверхности испытуемого образца не превышает 65ºС.

Было установлено, что температура на поверхности испытуемого образца зависит от схемы движения воды. Если воду подавать по схеме снизу вверх, то лучше прогревается нижняя часть, а если подавать воду сверху вниз, лучше прогревается верхняя часть образца.

У бетонных отопительных приборов большая часть тепла передается помещению при помощи излучения, тогда как у радиаторов теплоотдача излучением меньше радиационной составляющей. На эффективность работы бетонного отопительного прибора влияет конструкция, схема расположения нагревательного элемента, а также может влиять и форма лицевой поверхности. Поэтому с целью оптимизации геометрических параметров бетонных отопительных приборов было проведено компьютерное моделирование трех вариантов приборов с различным рельефом лицевой поверхности. Один из вариантов представлен на рис. 2.

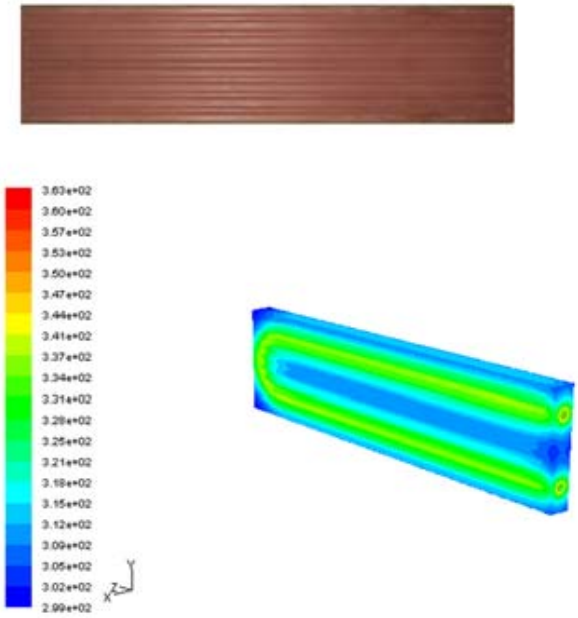


Рисунок 2. Экспериментальный образец бетонного отопительного прибора и его компьютерная модель

Таким образом, применив компьютерное моделирование, были определены конструктивные особенности будущего образца.

Имея возможность анализировать полученные компьютерные модели, открываются более широкие возможности по усовершенствованию существующих и вновь разрабатываемых конструкций бетонных отопительных приборов, что существенно позволить сократить временные и финансовые затраты на дальнейшие исследования.

Проведение теплотехнических испытаний эксперементальных образцов

На основе результатов компьютерного моделирования были изготовлены экспериментальные образцы. Внешний вид образцов представлен на рисунке 3.

Рисунок 3. Внешний вид экспериментальных образцов (сверху вниз: образец №1, образец №2, образец №3)

Испытания выполнялись на установке, содержащей следующее оборудование:

а) испытательную камеру, состоящую из:

- внутреннего ограждения;
- компенсационного ограждения.

в) кондиционер для охлаждения воздуха, циркулирующего между ограждениями;

с) первичный контур, который обеспечивал подачу нагревательной жидкости в испытуемые бетонные отопительные приборы;

Эксперимент проводился в закрытой камере с шестью охлаждаемыми, циркулирующим воздухам, поверхностями.

Температура воздуха, циркулирующего в зазоре между ограждениями, регулировалась так, чтобы обеспечить поддержание температуры воздуха, измеряемой в камере в контрольной точке, расположенной внутри камеры, в пределах значений от 19°С до 21°С с точностью до ±0,1°С.

Эксперимент проводился в стационарном режиме, который поддерживался в течение всего периода исследований.

Испытания проводились со следующими значениями средней температуры воды:

(45 ± 5)°C;

(50 ± 5)°C;

(65 ± 5)°C;

(75 ± 5)°C;

Каждое испытание длилось не менее 1 ч, в течение этого периода времени в течение равных, не превышающих 10 мин, интервалов времени регистрировались все измеряемые величины: температуры, расход воды через отопительный прибор.

В ходе испытаний измерялись температуры на входе в испытуемый образец и на выходе из него, а также температура в центре испытательной камеры. Для расчета тепловой мощности использовались средние значения полученных в испытаниях величин.

Для приведения рассчитанной мощности к нормальному давлению ее умножали на поправочный коэффициент:

$$1+\frac{\beta\Delta p}{p_0}, \quad (1)$$

где β – поправочный коэффициент равный 0,3 (для радиаторов);

Δp – разность действительного и нормального давлений, Па;

p_0 – нормальное атмосферное давление, Па.

Тепловая мощность выражалась в следующем виде:

$$\phi = B\left(t_{mean} - t_{\text{a}}\right)^n = B\left(\Delta t\right)^n, \quad (2)$$

где t_{mean} – средняя температура первичной жидкости;

$$t_{mean} = (t_e + t_s)/2, \quad (3)$$

где t_e – температура первичной жидкости на входе;

t_s – то же, на выходе;

t_a – температура воздуха в контрольной точке;

коэффициенты *B* и *n* рассчитывались методом наименьших квадратов по значениям $log\ \phi$, как функции $\log\left(t_{mean} - t_a\right) \equiv \log \Delta t$ с учетом весового коэффициента.

Из этой зависимости выводилась номинальная мощность для разности температур между средней температурой воды и контрольной температурой воздуха в испытательной камере, Δt, равной 70^0C.

Используя метод наименьших квадратов, получали следующие выражения для *logB* и *n*:

$$\log B = \frac{\sum \varpi \log\phi \sum \varpi (\log\Delta t)^2 - \sum \varpi \log\Delta t \sum \varpi \log\Delta t \log\phi}{\sum \varpi \sum \varpi \left(\log\Delta t\right)^2 - \left(\sum \varpi \log\Delta t\right)^2} \quad (4)$$

$$n = \frac{\sum \varpi \sum \varpi \log\Delta t \log\phi - \sum \varpi \log\Delta t \sum \varpi \log\phi}{\sum \varpi \sum \varpi \left(\log\Delta t\right)^2 - \left(\sum \varpi \log\Delta t\right)^2} \quad (5)$$

В результате компьютерного моделирования и натурных испытаний экспериментальных образцов были получены следующие результаты.

Образец №1

№ п/п	$T_{под}$, ^0C	$T_{обр}$, ^0C	$T_{ср}$, ^0C	$T_{пом}$, ^0C	G, л/с	q, Вт	Q, Вт
1	49,96	49,42	49,69	21,50	0,1	319,0	710,0
2	59,87	59,14	59,50	19,43		363,0	
3	65,05	64,15	64,60	19,87		475,0	
4	75,05	73,64	69,48	20,58		614,0	

Образец №2

№ п/п	$T_{под}$, ^0C	$T_{обр}$, ^0C	$T_{ср}$, ^0C	$T_{пом}$, ^0C	G, л/с	q, Вт	Q, Вт
1	45,03	44,28	44,65	20,83	0,1	309,0	830,0
2	55,13	54,06	54,59	19,64		443,0	
3	65,09	63,08	64,44	19,70		530,0	
4	75,03	73,40	74,22	19,48		670,0	

Образец №3

№ п/п	$T_{под}$, ^0C	$T_{обр}$, ^0C	$T_{ср}$, ^0C	$T_{пом}$, ^0C	G, л/с	q, Вт	Q, Вт
1	45,03	44,29	44,66	20,25	0,1	306,0	742,0
2	55,05	54,01	54,53	19,80		430,0	
3	65,15	63,91	64,53	19,45		509,0	
4	75,05	73,58	20,57	19,92		600,0	

Заключение

Результаты компьютерного моделирования и эксперимента показали, что бетонные отопительные приборы как альтернатива существующим отопительным приборам имеют значительный потенциал для дальнейшего совершенствования и массового внедрения.

Из проведенных исследований можно сделать предварительный вывод о том, что влияние рельефа лицевой поверхности на теплоотдающую способность отопительного прибора имеет место быть. Однако это требует дальнейших более детальных исследований: построения более сложной компьютерной модели, учитывающей больше критериев для расчетов, проведения большего числа натурных экспериментов с различными параметрами сред и т.д.

В жилищном и промышленном строительстве применение рассмотренных выше бетонных отопительных приборов, элементы которых конструктивно могут быть связаны с частями зданий, является необходимым и оправданным, так как изготовление таких приборов не несет за собой значительных материальных затрат и может быть освоено любым домостроительным комбинатом, что даст соответствующий экономический эффект. Бетонные отопительные приборы могут стать объектом более пристального внимания в связи с тенденцией к увеличению термического сопротивления ограждающих конструкций.

Высокие эксплуатационные и санитарно-гигиенические показатели бетонных отопительных приборов подтверждают целесообразность широкого внедрения в практику современного проектирования систем отопления, жилищного и гражданского строительства.

Литература

1. Либер И.С. Системы отопления с бетонными нагревательными поверхностями. Л., 1966.

Алексей Александрович Фролов, г. Минск

Тел. раб.: 8(10-375-17) 267-10-01, эл. почта: info@belniis.by

Система теплоснабжения Санкт-Петербурга на современном этапе и возможности ее модернизации

Консультант проектного отдела В.С. Слепченок,
ЗАО «РСУ-103»;
Советник генерального директора Г.П. Петраков*,
ГК «103 Трест»

Проблемы обеспечения тепловой энергией Санкт-Петербурга в связи с достаточно суровыми климатическими условиями по своей значимости могут сравниться с проблемами обеспечения населения продовольствием и представляют задачу большой государственной важности. Санкт-Петербург – самый большой мегаполис северных широт, имеющий одну из крупнейших в мире систем централизованного теплоснабжения. Общая протяженность магистральных и внутриквартальных теплотрасс города составляет около 5000 км в двухтрубном исчислении (обычно теплотрасса состоит из двух труб: по одной горячая вода поступает от теплоисточника к потребителю, а по другой охлажденная возвращается обратно).

Санкт-Петербург – родина централизованного теплоснабжения – имеет различные схемы теплоснабжения. Из этих схем наибольшее распространение получила схема централизованного теплоснабжения с открытым водоразбором на горячее водоснабжение. В середине 60-х годов темпы ввода жилья в Санкт-Петербурге значительно опережали ввод практически всех инженерных систем и коммуникаций, и руководством города было принято решение строить вместо ТЭЦ относительно дешёвые крупные котельные мощностью 260-280 Гкал/ч. Однако принципиальная схема теплоснабжения осталась прежней. При этой схеме каждый потребитель тепла подключается к общей тепловой сети ТЭЦ или районной котельной непосредственно, без центральных тепловых пунктов (ЦТП). Подключение осуществлялось по общепринятой схеме: системы отопления подключались через элеваторы, а системы горячего водоснабжения – по открытой схеме (через регулятор температуры).

Тепловая сеть, как правило, сооружалась радиальной, что предусматривалось ранее действующими нормами и требовало наименьших капиталовложений. Со временем тепловые нагрузки, число подключенных потребителей, диаметры сетей, общая протяжённость сетей и расстояния от ТЭЦ или котельных до удалённых потребителей резко возросли, а принципиальная система теплоснабжения оставалась, в основном, неизменной.

Произошли принципиальные изменения самих потребителей тепла, которые стали оказывать существенное влияние на систему теплоснабжения за счет непосредственного водоразбора горячей воды. В частности:

- новые жилые дома стали сооружаться с ваннами в каждой квартире, что резко увеличило удельный вес горячего водоснабжения, который доходит в настоящее время до 30% от общего теплового отпуска;
- вместо прежней малоэтажной жилой застройки стали сооружаться здания повышенной этажности.

Сложившаяся система горячего водоснабжения имеет серьёзные недостатки:

- повышенная коррозийная агрессивность невской воды приводит к проявлению внутренней коррозии металла трубопроводов, что сопровождается повышением цветности воды горячего водоснабжения;
- при большом удельном весе горячего водоснабжения и большой протяженности происходит изменение пьезометрического графика тепловых сетей, в результате этого в верхних этажах зданий повышенной этажности происходит нарушение бесперебойного горячего водоснабжения.
- присутствуют перетопы в осенне-весенние периоды отопления.

Необходимо также отметить, что в последние десятилетия значительно ухудшилось качество применяемых металлических труб. Анализ реальных сроков эксплуатации трубопроводов тепловых сетей показал, что при полном соответствии стали и труб требованиям технических условий возможны коррозионные повреждения трубопроводов в сроки существенно ниже нормативных. Перенос основных операций по обработке жидкой стали из сталеплавильной печи в ковш привел к коренным преобразованиям идеологии организации сталеплавильного производства. Однако применение данной технологии привело к появлению в стали условно коррозионно-активных неметаллических включений (КАНВ), которые вносятся в сталь в процессе внепечной обработки жидкой стали в ковше с участием высокоосновного шлака и при определенных технологических параметрах вызывают высокую скорость коррозии стали независимо от ее марки. Исследование КАНВ в сталях текущего производства различных отечественных и зарубежных заводов показали, что значительная часть производимых сегодня трубных сталей содержит КАНВ, в то время как стали, произведенные ранее (20-30 лет назад), таких включений не содержат.

Применение закрытой схемы горячего водоснабжения в системах теплоснабжения от крупных котельных решило бы ряд сложных вопросов. Однако попытка применения закрытой схемы горячего водоснабжения, сделанная много лет назад, выявила её непригодность. Это произошло из-за сильной агрессивности невской воды – сеть горячего водоснабжения после подогревателя и внутренние системы горячего водоснабжения жилых зданий подвергаются интенсивной внутренней коррозии и быстро выходят из строя. Учитывая вышеуказанные недостатки, в Ленинграде было принято решение о развитии открытой схема горячего водоснабжения с централизованным приготовлением воды на котельных и ТЭЦ.

В период интенсивного жилищного строительства была рекомендована схема подключения нагрузки отопления по независимой схеме. При данной схеме присоединения предусматривалось подключение потребителей через водоводяной подогреватель, устанавливаемый в центральном тепловом пункте (ЦТП), с подключением квартальной системы горячего водоснабжения к первичному источнику теплоснабжения.

Существующие схемы теплоснабжения Санкт-Петербурга характеризуются высокой повреждаемостью, большими тепловыми потерями и, как следствие, недостаточной (ниже расчётной) экономичностью эксплуатации водяных тепловых сетей. Низкая надёжность и экономичность тепловых сетей – следствие технической политики, проводимой в нашей стране на протяжении нескольких десятилетий. За последние 30 лет конструкция теплопроводов и применяемые гидро- и теплоизоляционные материалы не претерпели качественных изменений, и всё совершенствование проводилось за счёт индустриализации работ и снижения первоначальных затрат при строительстве. В настоящее время в основных нормативных документах отсутствует целостная концепция надёжности и экономичности теплоснабжения, которая бы учитывала особенности невских гидрологических и климатических условий, оптимальную мощность и необходимость резервирования теплоисточников и сетей, требования к материалам и трубам, эксплуатационно-ремонтному обслуживанию и т.д. Существующие стальные трубопроводы тепловых сетей быстро стареют, теряют свою герметичность.

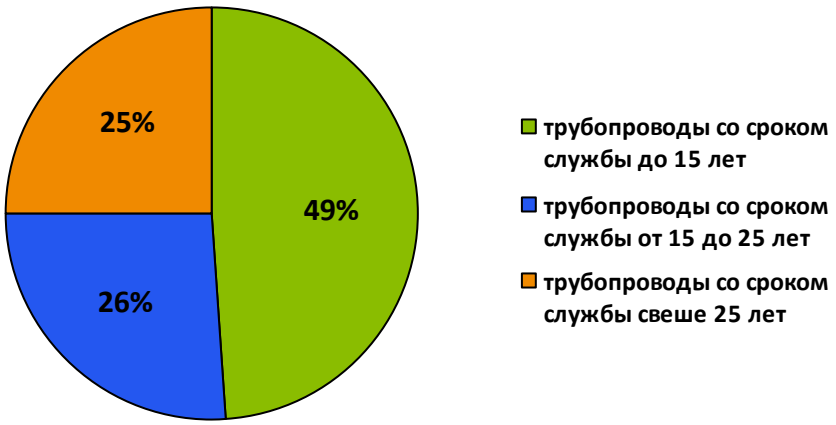
Утечки в системах теплоснабжения приводят к изменению водного режима прилегающих территорий, их подтоплению, а также к повышению коррозийной активности грунтов. Изменение гидрогеологического режима территории оказывает негативное воздействие на все здания и сооружения, построенные как на поверхности, так и под землёй. По оценкам ряда учёных, значительное ухудшение санитарно-эпидемиологического состояния жилых помещений, особенно расположенных на первых этажах, связано с подтоплением территории в результате аварий трубопроводов.

Кроме непосредственного отрицательного влияния вследствие разлива воды, разгерметизация трубопроводов вызывает необходимость проведения ремонтно-строительных работ по их восстановлению. Подобные работы, выполняемые в городских условиях, иногда требуют перекрытия проезжей части дорог, либо закрытия одной или нескольких полос движения, что нарушает нормальный ритм функционирования транспортного хозяйства города. Это приводит к замедлению движения автомобилей, к увеличению выброса вредных веществ с выхлопными газами, а также к увеличению (в 3-10 раз) количества дорожно-транспортных происшествий.

Таким образом, теплотрассы – наиболее уязвимый элемент системы теплоснабжения. Они поглощают основные бюджетные средства, выделяемые на отопление. Средний срок службы теплопроводов, которые прокладывались в Советском Союзе, не превышал 15 лет. К тому же с начала 90-х годов прошлого столетия работы по замене тепловых сетей практически прекратились, и износ накапливался более двух десятилетий.

На рисунке 1 представлено процентное распределение тепловых сетей системы теплоснабжения Санкт-Петербурга по сроку службы. Из диаграммы видно, что четверть тепловых сетей города находится в крайне изношенном состоянии.

Рисунок 1. Тепловые сети Санкт-Петербурга по сроку службы



Зависимость между ветхостью теплосетей и температурой в квартирах горожан прямая: чем больше износ – тем больше аварий и, соответственно, отключений тепла. Чтобы износ хотя бы не увеличивался, в северной столице необходимо ежегодно проводить замену **не менее 400 км трубопроводов тепловых сетей**.

Однако из-за нехватки средств совместными усилиями основными теплоснабжающими организациями города (ГУП «ТЭК Санкт-Петербурга» и ОАО «ТГК-1»), несмотря на большую поддержку городских властей, ежегодно удается заменить только около 250-300 км труб в двухтрубном исчислении. Но это капля в море, принимая во внимание, что не менее 2000 км трубопроводов тепловых сетей уже отработали свой срок и требуют замены в самое ближайшее время. У ГУП «ТЭК Санкт-Петербург» и ОАО «ТГК-1» просто нет средств, чтобы заменять ветхие трубопроводы, а стоимость их прокладки необычайно высока: прокладка одного километра теплотрассы в двухтрубном исчислении оценивается в 300-700 тыс. $. Таким образом, износ сетей будет только нарастать, как и количество аварий и отключений тепла в зимний период.

В настоящее время надежность и непрерывность теплоснабжения потребителей в Санкт-Петербурге не соответствует современным требованиям. В отличие от Москвы, где дефектов меньше и теплосети закольцованы, в Санкт-Петербурге радиальная система теплоснабжения. Преимущество закольцованной системы в том, что при обнаружении дефекта она позволяет тут же переключиться на другое кольцо и избежать отключения жилых зданий. В Петербурге же любой, даже незначительный, прорыв может отразиться на сотнях домов. К тому же нельзя забывать, что около 80% теплового оборудования котельных ГУП «ТЭК Санкт-Петербурга» и ТЭЦ ОАО «ТГК-1» находятся в эксплуатации 25 лет и более. Оно физически и морально устарело и требует коренной реконструкции, а большинство котлов эксплуатируется уже 40-50 лет.

Когда в результате некачественного отопления температура в квартирах падает ниже приемлемого уровня, население в массовом порядке начинает использовать электронагревательные приборы. Потребление электрической нагрузки резко повышается, а это, в свою очередь, приводит к многочисленным повреждениям в электросетях и отключениям электрической энергии в жилых домах. Ежегодно зимой в Санкт-Петербурге происходит огромное количество таких аварий. Сомнительным утешением может послужить тот факт, что город на Неве не одинок в своих проблемах.

Общая протяженность теплосетей России немногим более 180 тыс. км, а износ уже составляет около 120 тыс. км. В целом по стране среднегодовое количество аварий на теплотрассах составило более двух на 1 км трубопроводов в год, увеличившись примерно в двадцать раз с конца 80-х годов. В силу сложившейся ситуации широкое распространение получила практика аварийной замены отдельных участков тепловых сетей, когда работы выполняются на скорую руку, зачастую в неблагоприятных метеоусловиях и с нарушением технологии. Расходование средств при этом на порядок больше стоимости плановых мероприятий по капитальному ремонту и замене теплопроводов. Как показали наблюдения начиная с 80-х годов прошлого столетия, при температуре наружного воздуха ниже минус 15ºС и повреждаемости тепловых сетей 3 аварии в год на 1 км теплотрассы коллапс централизованного теплоснабжения в городе неизбежен.

В настоящее время при строительстве или комплексной реконструкции систем выработки, транспортировки и потребления тепловой энергии появляется возможность применения новых технологических процессов, материалов и оборудования, которые позволяют значительно повысить эффективность использования химической энергии топлива, качество, надежность и экономическую эффективность выработки и транспортировки тепла к потребителю. Новые технологии, материалы (гофрированные трубы из нержавеющей стали, полиэтиленовые трубы, теплоизоляция из пенополиуретана с защитной полиэтиленовой оболочкой) и оборудование (теплообменники, деаэраторы) позволят значительно увеличить длительную надежную работоспособность всех элементов системы теплоснабжения, снизить эксплуатационные расходы теплоснабжающих организаций.

Однако необходимо учитывать, что наибольшая эффективность получается при комплексной реконструкции источника теплоснабжения, средств транспортировки и домовых систем потребления тепловой энергии. В противном случае необходимо будет предусматривать дополнительные мероприятия, которые бы исключали отрицательное взаимное влияние друг на друга отдельных технологических звеньев системы теплоснабжения (например, требуется реконструкция системы ГВС при переходе на закрытую схему теплоснабжения). При этом капитальные вложения значительно вырастут.

Учитывая наличие большого количества устаревшего оборудования и трубопроводов тепловой сети наружных и внутридомовых систем, их моральную и физическую изношенность, а также техническую отсталость применяемых технологий их функционирования, реконструкция и модернизация системы теплоснабжения города должна осуществляться комплексно по отдельным зонам теплоснабжения.

Приведем наглядный пример энергосбережения. Проведение реконструкции тепловой сети с заменой старой двухтрубной теплотрассы в изоляции из армопенобетона, проложенной в подземном канале более 25 лет назад и разрушенной в среднем на 85 %, на новую двухтрубную теплотрассу в изоляции из пенополиуретана с защитной полиэтиленовой оболочкой, проложенную бесканально под землей, позволит

добиться **снижения удельных годовых тепловых потерь в среднем в 15 раз**. Результаты вычислений расчетных годовых потерь приведены в таблице 1, расчет толщины тепловой изоляции и тепловых потерь тепловой сети выполнен в соответствии с требованиями СНиП 41-02-2003 «Тепловые сети», СНиП 23-01-99* «Строительная климатология», СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» и СП 41-103-2000 «Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов».

Таблица 1. Расчетные годовые потери

Наружный диаметр тр-да, мм	Толщина стенки тр-да, мм	Расчетные потери (бесканальная прокладка в ППУ), Вт/м	Расчетные годовые потери (бесканальная прокладка в ППУ), Гкал/км	Расчетные потери (канальная прокладка в старом АПБ), Вт/м	Расчетные годовые потери (канальная прокладка в старом АПБ), Гкал/км
57	3,0	43,4	168,2	45,0	202,6
76	3,0	50,1	194,4	52,5	236,4
89	4,0	52,8	204,8	74,0	333,2
108	4,0	58,4	226,4	80,0	360,2
133	4,0	66,4	257,5	115,0	517,7
159	4,5	73,8	286,3	125,0	562,8
219	6,0	86,9	337,1	183,0	823,9
273	7,0	86,6	336,0	213,0	959,0
325	7,0	97,3	377,2	474,0	1785,1
426	7,0	112,6	436,8	672,0	2530,8
530	7,0	107,0	414,8	791,0	2979,0
630	8,0	125,5	486,8	1032,0	3886,6
720	8,0	133,6	518,1	1152,0	4338,6
820	9,0	137,8	534,4	1280,0	4820,6
920	10,0	148,6	576,5	1408,0	5302,7
1020	11,0	159,3	617,8	1536,0	5784,8
1220	11,0	165,1	640,4	1800,0	6779,0
1420	12,0	180,1	698,5	2304,0	8677,1

В рамках решения задач, поставленных в «Энергетической стратегии России на период до 2030 года», в Санкт-Петербурге проводится реформа системы теплоснабжения с целью снижения потерь тепловой энергии в тепловых сетях, жилых и общественных зданиях и повышения энергетической эффективности системы. В 2009 году Комитетом по строительству по инициативе Законодательного Собрания начата работа по разработке руководящего методического документа (РМД) «Устройство тепловых сетей в Санкт-Петербурге», который установит обязательные для применения в Санкт-Петербурге требования и рекомендуемые положения, учитывающие природно-климатические и социальные особенности, а также экономические возможности города как субъекта Российской Федерации.

** Геннадий Петрович Петраков, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7 (812) 7842038; эл. почта: p@103trest.ru

К разработке генеральной схемы водоотведения г. Уфы

Д.т.н., профессор В.М. Васильев*,
ГОУ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет;
Инженер А.В. Малков,
ООО «ПИБ Инженерные экосистемы»

Столица Башкортостана Уфа – динамично развивающийся город, где наблюдается развитие индустрии, строительство дорог, намыв прилегающих территорий, а главное, регулярный прирост численности населения, что, в свою очередь, влечет строительство новых микрорайонов, а следовательно, увеличение мощности инженерных сетей, в том числе включающих и систему отведения стоков. В связи с этим было принято решение о реконструкции системы водоотведения города. Особенности проекта, находящегося на стадии согласования с заказчиком, описаны в данной статье.

Особенностью водоотведения Уфы является полная раздельная система канализации, т.е. имеется хозяйственно-бытовая сеть, по которой также транспортируются и промышленные стоки, и отдельная сеть, отводящая дождевые стоки. На балансе ГУП «УФАВОДОКАНАЛ» находится хозяйственно-бытовая сеть.

Ввиду значительной разницы отметок дневной поверхности (до 100 м) используется большое количество насосных станций с протяженными напорными водоводами и камерами гашения напора на конце, перекачивающих сточную жидкость по принципу каскада из одного канализационного бассейна в другой и так далее до городских очистных сооружений (ГОС) (рис. 1).

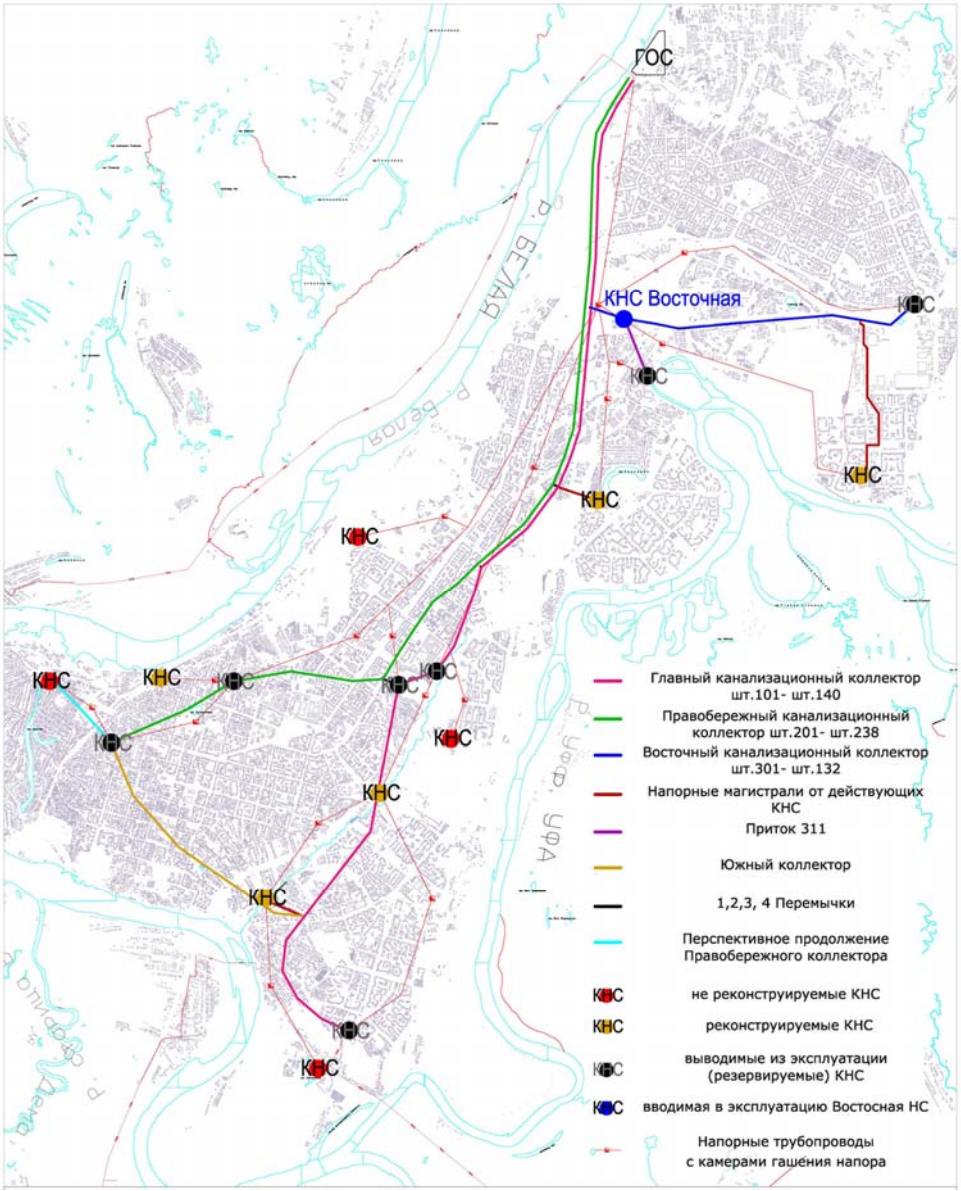


Рисунок 1. Схема канализации г. Уфа до и после реконструкции

Общая протяженность самотечных сетей и напорной канализации более 900 км. На сети 25 насосных станций, 15 из которых не имеют второго напорного водовода. Существующие напорные водоводы из-за недостаточной пропускной способности работают с повышенным давлением. В случае повреждения неизбежна остановка КНС со сбросом большого объёма сточных вод в водоем. Насосные станции, имеющие по два напорных водовода, из-за длительного срока эксплуатации имеют низкую надежность по перекачке стоков. Процесс перекачки ведется по двум напорным линиям, и при аварии на одной из них вторая ввиду маленького диаметра не обеспечивает 100% пропускной способности, что также приводит к сбросу части стоков в водоем.

В канализационной сети при условиях насыщенной влажности, температуре воздуха 18-20°С, при безнапорном движении жидкости создаются благоприятные условия для возникновения биологической коррозии – результата жизнедеятельности тионовых бактерий.

Наличие большого количества напорных трубопроводов усугубляет сложившуюся обстановку. Напорные трубопроводы с колодцами гашения на конце фактически являются локальными дегазаторами сточных вод и способствуют разрушению канализационной сети. Под действием анаэробных процессов, возникающих при движении сточной жидкости в трубопроводах без доступа воздуха, происходит образование в них растворенного сероводорода, который выделяется при попадании в газовую среду, где концентрация его значительно меньше. Значительные разрушения железобетонных конструкций, вызванные газовой коррозией, наблюдаются на участках смены напорного режима движения на безнапорный.

На участках со значительными скоростями движения сточной жидкости наблюдается истирание лотка трубопровода. Износ самотечных коллекторов составляет 60%, напорных трубопроводов – 80%.

С учетом высокой стоимости и сложности эксплуатации существующей сети, большой энергозатратности КНС, малой надежности, сложности архитектурной планировки города было принято решение о проектировании единой самотечной системы канализования города со строительством тоннельных коллекторов глубокого заложения в соответствии с Генеральным планом на 2015-2025 гг.

Тоннельные коллекторы позволяют транспортировать значительные объемы сточной жидкости, сократить количество насосных станций, снизить энергозатратность, упростить процесс эксплуатации канализационной сети, прекратить сброс неочищенных сточных вод, повысить надежность системы водоотведения.

Рисунок 2. Профиль главного канализационного коллектора

При разработке генеральной схемы планировки канализационных тоннелей ставились задачи:

- перехватить максимальный расход сточных вод путем переключения расхода сточных вод, притекающих к насосным станциям, на вновь строящиеся канализационные шахты;
- трассировку трассы осуществлять с учетом заглубления не более 20-25 м;
- для обеспечения надежности сети предусмотреть дублирование и кольцевание тоннельных коллекторов путем устройства перемычек с шиберными задвижками;
- диктующей точкой заглубления Главного коллектора на его конце принять приемный лоток очистных сооружений (рис. 2) – при большем заглублении коллектора необходимо строительство насосной станции в районе ГОС, что с экономической точки зрения нецелесообразно);
- расстояние между шахтами на коллекторе принимать не более 500 м;
- диаметр и уклон коллекторов принимать с учетом создания не заиливающих скоростей;
- при определении диаметра, учитывая нормальный срок эксплуатации тоннелей 100 лет [1] и прогнозируемое увеличение расхода, принимать заполнение коллектора h/D=0,5.

В соответствии с поставленными задачами была разработана система тоннельных коллекторов города Уфы, включающая в себя три коллектора (Главный, Правобережный, Восточный) общей протяженностью 39 км, 91 смотровых, перепадных, поворотных шахт, одну насосную станцию подъема производительностью 4,8 м^3/с, четыре перемычки, соединяющие Главный и Правобережный коллекторы, приток «311» протяженностью 1 км, Южный закольцовывающий коллектор протяженностью 4 км (рис. 1). Там же на схеме представлены напорные трубопроводы, которые при вводе тоннельных коллекторов могут быть выведены из эксплуатации.

Гидравлический расчет проводился с учетом проходки тоннеля одним щитовым комплексом, одним рабочим сечением, (в данном случае диаметр коллектора составит 2000 мм). На начальных участках коллектора рабочий диаметр, выполняемый микротеннелированием, принимался 1500 мм.

Скорости на начальных участках коллекторов приняты V_{min}=0,8 м/с с заполнением h/D=0,4. С учетом полученных значений уменьшение диаметра нецелесообразно, так как в случае аварии возможно движение жидкости по Южному коллектору в обратном направлении. В этом случае коллектор должен пропускать значительное количество стоков, что при уменьшении диаметра с учетом перспективного увеличения расхода невозможно.

Трассы Главного и Правобережного коллекторов на конечных участках проходят рядом друг с другом на расстоянии 30 м, между ними устроены перемычки. Это увеличивает надежность системы водоотведения. Канализационные перепады на Главном коллекторе между бассейнами канализования разного заложения достигают 75 м. Такие перепады отработаны на моделях в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете [1]. Они построены и эксплуатируются в Москве, Санкт-Петербурге, Ростове-на-Дону и других городах России и мира.

Восточный коллектор собирает сточные воды с восточной части города. При трассировке трассы получена глубина заложения коллектора ниже отметки подключения к главному коллектору. Поэтому в точке примыкания восточного коллектора к главному необходимо строительство насосной станции подкачки, которая будет принимать весь сток, поступающий от Восточного коллектора и перебрасывать его в верхний бассейн канализования. На рис. 3 представлено конструктивное решение канализационной насосной станции «Восточная» с погружными насосами «WILO EMU».

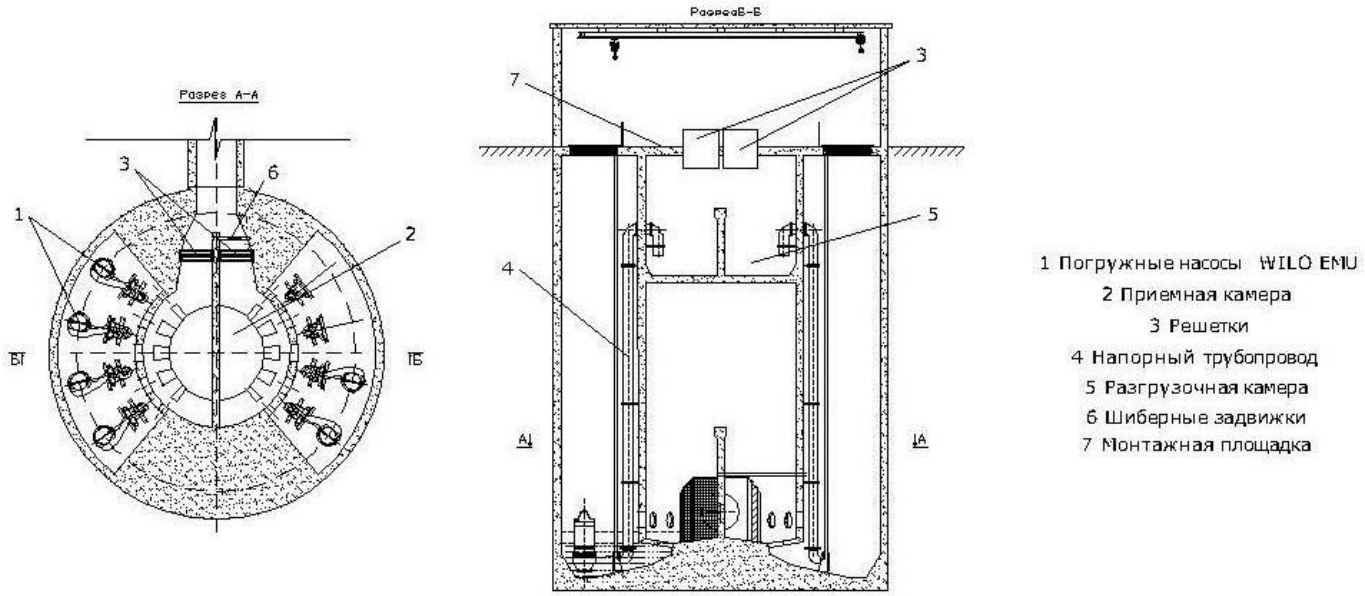


Рисунок 3. Восточная канализационная насосная станция

Таким образом, применение тоннельных коллекторов в геологических условиях города Уфы стало принципиальным инновационным предложением проекта. Реализация данного проекта и ввод в эксплуатацию самотечных тоннельных коллекторов позволяет:

- увеличить пропускную способность канализационной сети до 4,8 м^3/с, или 415000 м^3 в сутки, что на 40% больше приходящего с Зауфимья на сегодняшний день стока;
- решить вопрос транспортировки дополнительных расходов сточных вод;
- создать новые районы канализования, адаптированные под застройку;
- прекратить несанкционированный сброс сточных вод в водоем;
- перевести в резерв 7 КНС, реконструировать 4 КНС – в результате количество насосных станций сократится на 50%;
- транспортировать самотеком на ГОС 55% перекачиваемой сточной жидкости;
- поднимать на меньшую высоту 30% перекачиваемой сточной жидкости.

Экономический эффект от сокращения эксплуатационных затрат на подъем сточной жидкости составит не менее 54 млн. рублей в год.

Литература:

1. Васильев В.М. и др. Техническая эксплуатация системы канализационных тоннелей. Учебное пособие. СПб., 2002.

** Виктор Михайлович Васильев, Санкт-Петербург*

Тел раб.: +7(812)633-33-17; эл. почта: gidr1@spbgasu.ru

К вопросу о необходимости внедрения эффективных систем климатизации зданий

Коммерческий директор Л.Л. Гошка*,
ООО «Кола»

В предыдущей статье [1] мы рассмотрели связь между качеством воздуха в помещении и влиянием этого воздуха на клеточные функции и установили, что:

1) при высоком загрязнении окружающей среды обеспечение приемлемого качества воздуха в помещении, наряду с обеспечением человека экологически чистыми продуктами питания и водой, становится социально важной задачей;
2) климатические системы, которые создал проектировщик, в процессе эксплуатации влияют на химический состав и исходные концентрации химических соединений в воздухе помещения;
3) воздух после обработки в климатических системах может воздействовать на большинство биохимических реакций, координацию и регуляцию физиологических процессов в клетках организма конечного пользователя этих систем.

Отсюда напрашивается вывод, что в условиях экологического кризиса обеспечение приемлемого качества воздуха в помещениях является важной задачей по снижению отрицательного влияния окружающей среды на этногенез [2]. Эту важную задачу должно реализовывать государство как социальный институт, созданный этносом для собственной защиты. Но государство защищает этнос в целом, а не отдельного человека. А собственный дом, себя и свою семью человек будет защищать самостоятельно, в том числе обеспечивать себя экологически чистыми продуктами питания, водой и воздухом приемлемого качества. Очевидно, что отдельно взятому человеку приятнее приобретать ту одежду, которая его устраивает и которая ему необходима для терморегуляции организма, чем получать одежду от государства, как это происходит в армии или в местах лишения свободы.

Далее рассмотрим только часть угроз, от которых нам придется защищаться самостоятельно.

Следует отметить, что:

1) обеспечение качества воздуха в помещении является малоизученной проблемой;
2) без создания теории обеспечения качества воздуха в помещении, обеспечить это качество воздуха на практике достаточно проблематично.

Отсюда можно сделать вывод, что на изучение проблемы и создание теории обеспечения качества воздуха в помещении потребуется достаточно большой промежуток времени. А вот есть ли у нас этот запас времени или нет? Попробуем установить.

Для того чтобы определиться в сроках начала внедрения эффективных систем климатизации зданий, нам необходимо установить, действительно ли нам необходимы такие системы. До сих пор мы обозначали проблему качества воздуха в помещении только теоретически. При этом обосновывать необходимость внедрения эффективных систем климатизации зданий из-за острого недостатка экспериментальных данных приходилось на уровне предположений. Но, как хорошо известно, теория не всегда может достаточно точно описывать реальные процессы. Тем более, когда она строится на предположениях и не подтверждена экспериментальными данными. Поэтому нам необходимо получить практическое подтверждение о необходимости внедрения эффективных систем климатизации зданий.

На самом деле, практических примеров такой необходимости множество, вот некоторые из них.

1. По заключениям комиссии CPSC [3] домовладельцы жалуются на запах тухлых яиц внутри жилых помещений, некоторые болезненные симптомы, такие как раздражение и зуд кожи и глаз, дыхательные трудности, потемневшие и поржавевшие металлические предметы и поверхности в своих домах, а также участившуюся замену различных компонентов климатических систем. Кроме этого, медные теплообменники большого количества климатических систем подвергаются разрушительному воздействию коррозии, и до такой степени, что кондиционерная американская промышленность уже бьет тревогу. Истинная причина еще пока не установлена, однако предварительные исследования указывают на гипсокартон зарубежного производства, в котором обнаружена сера. Предварительный отчет, опубликованный агентством EPA, обнаружил серу, стронций и повышенный уровень концентрации железа в образцах китайского гипсокартона по сравнению с аналогичным материалом производства США, где следов серы вообще обнаружено не было. При использовании гипсокартона китайского производства новый теплообменник может подвергнуться разрушению, вызванному коррозией, в течение нескольких месяцев, обычно менее года.

То есть выделения от гипсокартона в воздух помещения разрушали теплообменники, а также приводили к ухудшению здоровья людей. Ранее мы подробно рассматривали аналогичные процессы, которые могут происходить на любой высокоразвитой поверхности внутри помещений [4].

2. Столичный (Москва) воздух в ночь на 27 августа 2009 года был самым грязным за весь месяц [5], а по некоторым показателям даже за все лето. Это, по мнению экологов, могло привести к ухудшению здоровья горожан.

Были отмечены превышения допустимых нормативов по угарному газу в 1,5 раза, по оксиду азота – в 2,5 раза, а по сероводороду в Косино-Ухтомском районе – в 5 раз, – сообщил GZT.RU специалист информационно-аналитического отдела Мосэкомониторинга Алексей Попиков.

Повысилось в воздухе и общее содержание взвешенных веществ. Особенно на северо-востоке и востоке столицы – на 10 и 20% соответственно.

При этом специалист «Мосэкомониторинга» подтвердил, что подобные условия приводят к ухудшению здоровья: «Если [такие] условия кратковременны, то может произойти легкое ухудшение здоровья, а если они растягиваются на длительное время, то это может вызвать и хронические заболевания».

Кроме этого специалист Мосэкомониторинга пообещал, что во второй половине дня 27 августа московский воздух окажется вполне чистым из-за влияния атмосферного фронта, но при этом так и осталось неизвестным, когда ПДК в самих помещениях придет в норму.

3. Из статьи Е.О. Шилькрота и Ю. Д. Губернского «Сколько воздуха нужно человеку для комфорта?», журнал АВОК, №4-2008, следует [6]:

«Ученый из Великобритании Д. С. Робертсон пишет в журнале Current Science, Vol. 90, No. 12, 06.25.2006: “При концентрации CO_2 600 ppm в помещении люди начинают чувствовать признаки ухудшения качества воздуха. Когда концентрация CO_2 становится выше этого уровня, некоторые люди начинают испытывать один или несколько классических симптомов отравления углекислотой, такие как проблемы с дыханием, учащенный пульс, головная боль, снижение слуха, гипервентиляция, потливость, усталость”.

«Измерения в офисах и на улицах Москвы показали, что в ряде офисов уровень CO_2 достигал 2 000 ppm и выше. Уровень углекислого газа на улицах колебался в показателях до 1 000 ppm, но измерения были сделаны не в самые неблагополучные дни, с точки зрения климатической обстановки».

«Становится очевидным, что при больших загрязнениях приземного слоя атмосферного воздуха, что имеет место в мегаполисах, воздухообмен резко возрастает. Это обстоятельство делает бессмысленным приток наружного воздуха. Выход – применение абсорбера углекислого газа, рациональное размещение воздухозабора, управляемые системы вентиляции (с переменным расходом воздуха или работающие периодически в периоды минимального загрязнения атмосферы)».

Но, учитывая опыт США, который приведен в первом примере, периодически работающая система вентиляции может тоже привести к отрицательному результату – повышению концентрации химических соединений, которые могут выделяться из строительных и отделочных материалов в помещении.

С нашей точки зрения, выходом из сложившейся ситуации может служить внедрение эффективных систем климатизации, которые должны в первую очередь включать в себя приточно-вытяжную систему вентиляции с механическим побуждением.

В основу работы системы вентиляции положен принцип разбавления химических соединений. Для простоты рассмотрим разбавление химических соединений в растворах.

Пусть имеется замкнутый сосуд с раствором (рис. 1). Раствор в сосуде имеет объем V_1. Предположим, что средой обитания человека (особи) является не воздушная среда, а водная. Помещаем в данный раствор особь и наблюдаем за реакцией организма этой особи. Пусть реакция организма соответствует характерной реакции организма для зоны верхнего пессимума. Наша задача состоит в том, чтобы перевести ее в зону оптимума, или естественную среду обитания, к которой эта особь адаптирована. Для этого берем второй сосуд, но уже с дистиллированной водой. Два сосуда соединяем трубопроводом и ставим насос. Насосом начинаем в первый сосуд закачивать дистиллированную воду. Чем больший объем дистиллированной воды мы закачаем в первый сосуд, тем более разбавленный раствор мы получим в первом сосуде. Итак, закачивать будем постепенно, и параллельно этому процессу будем отслеживать реакцию организма на разбавление раствора.

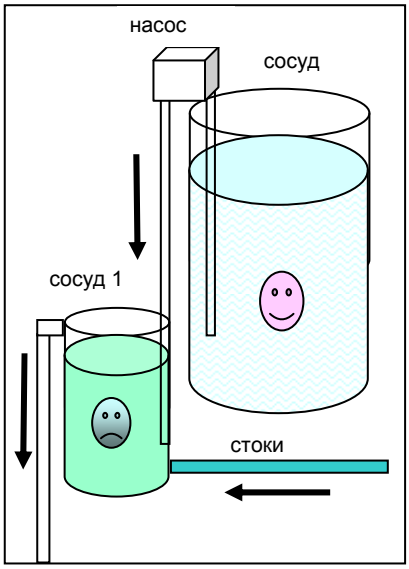


Рисунок 1. Схематичное изображение процесса разбавления раствора

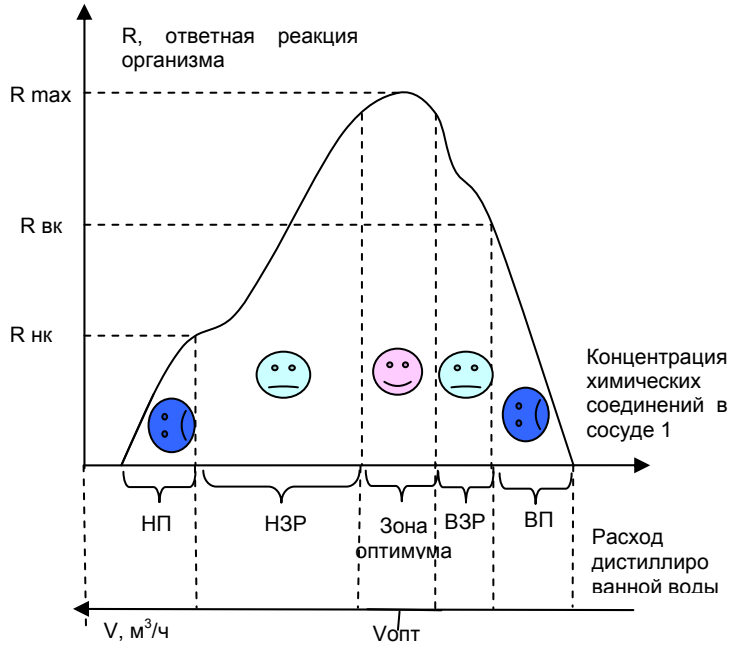


Рисунок 2. Зависимость реакции организма от расхода дистиллированной воды.
Нижний пессимум (НП) – зона нарушения жизнедеятельности низким значением фактора;
НЗР и ВЗР – соответственно нижняя и верхняя зоны регуляции, в пределах которых, несмотря на отклонение фактора от оптимальных значений, за счёт механизма экологической регуляции поддерживается нормальная жизнеспособность вида;
верхний пессимум (ВП) – зона нарушения жизнедеятельности высоким значением фактора; НК – нижняя критическая, ВК – верхняя критическая точка

Когда реакция организма особи будет соответствовать реакции, характерной для зоны оптимума (рис. 2), и при условии, что у особи нет метаболических выделений в раствор, нам необходимо будет отключить насос и прекратить дальнейшее разбавление раствора. При этом мы бы установили, что нам для разбавления потребовалось дистиллированной воды в объеме V_2. Если мы и дальше будем разбавлять раствор в первом сосуде, то реакция организма особи будет стремиться к зоне нижнего пессимума.

Следовательно, дальнейшее разбавление раствора может наносить вред организму. Если весь данный процесс мы будем проделывать не с дистиллированной водой, а с раствором, назовем его чистым раствором, который мы получили отключением насоса, тогда очевидно, что нам потребуется раствора на разбавление гораздо больше, чем дистиллированной воды, т.е. $V_3 > V_2$.

С учетом того, что метаболические выделения особи в раствор все-таки происходят, отключить насос мы не можем, т.к. эти выделения необходимо будет также компенсировать разбавлением. Пусть кроме метаболического загрязнения раствора мы имеем дополнительно и внешнее загрязнение (например, за счет канализационных сбросов). Следовательно, для разбавления нам потребуется еще больше чистого раствора, т.е. $V_4 > V_3$.

В том случае, если мы вынуждены разбавлять раствором по качеству хуже, чем чистый раствор, тогда перед разбавлением нам необходимо провести очистку этого раствора до уровня чистого, и только после этого разбавлять этим раствором. Поскольку объем сосуда ограничен, а для разбавления требуется большое количество чистого раствора, нам необходимо организовать отвод излишнего объема раствора. А теперь перейдем из водной среды к воздушной. Объем первого сосуда заменим помещением, раствор в первом сосуде – на воздух помещения, чистый раствор – на атмосферный воздух, канализационные стоки – на выделения от строительных материалов, мебели и т.д. в помещении, трубопровод с насосом – на вентиляционную установку с системой воздухораспределения. Тем самым, при переходе от водной среды к воздушной рассматриваемая проблема не меняется.

Отсюда можно сделать следующие выводы.

1. Система вентиляции с механическим побуждением должна быть прямоточной, т.к. рециркуляция воздуха при использовании ее в общеобменной системе вентиляции может нанести больший вред здоровью, чем отсутствие вентиляции. Опишем работу системы вентиляции с рециркуляцией при помощи той же водной модели. Тогда здание – это сосуд, а помещения здания – это изолированные ячейки в сосуде, и тогда интерпретировать данную ситуацию можно следующим образом. Пусть первый сосуд состоит из нескольких замкнутых ячеек. В каждой ячейке находится по особи, и канализационные сбросы отличаются в каждой ячейке. Трубопроводом из каждой ячейки забираем раствор, выводим из ячейки, а в отдельной специализированной ячейке в этот трубопровод подмешиваем чистый раствор, и после этого подмешанный раствор, который хуже чистого раствора, снова подаем в каждую ячейку. Следует отметить, что если одна из особей имеет серьезное заболевание (в случае воздушной среды это может быть инфекционное заболевание, которое передается воздушно-капельным путем), риску заболеть подвергаются все особи, которые находятся в сосуде. Химическое загрязнение в каждой ячейке свое. При рециркуляции мы усредняем это загрязнение и распространяем по всем ячейкам, тем самым усложняем сложившуюся ситуацию.

2. Режим работы системы вентиляции должен быть круглосуточным и круглогодичным с переменным расходом наружного воздуха. Это условие необходимо для того, чтобы исключить возможность образования новых химических соединений на высокоразвитой поверхности внутри помещения в отсутствие людей.

3. При необходимости должна быть обеспечена глубокая очистка приточного воздуха.

4. В основе обеспечения качества воздуха должен лежать расчет воздухообмена (расход наружного воздуха).

Сложность в решении задачи по обеспечению качества воздуха в помещении заключается в том, что, как правило, неизвестны загрязнители в помещении и скорость их выделения. Неизвестно качество атмосферного воздуха. Известно, что химические соединения приводят к различным заболеваниям, но неизвестен сам механизм воздействия на организм. Поэтому для того чтобы обеспечить эффективность приточно-вытяжной системы вентиляции в части обеспечения качества воздуха в помещении, значение нормативного расхода воздуха необходимо увеличить.

В вопросе обеспечения качества воздуха в помещении также представляет интерес рассмотреть опыт стран Евросоюза. Ф. Аллард, президент Федерации европейских ассоциаций в области отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха (REHVA) в приоритетных направлениях для повышения энергоэффективности зданий в Европе отметил [7], в частности, следующие.

1. Разработчики инженерных систем должны взять на себя ведущую роль в подготовке стратегических действий и возглавить битву против глобальных климатических изменений. Уже созданы некоторые инструменты, необходимые для начала решения проблемы, но совершенно очевидно, что в течение следующих десятилетий еще многое надо изучить и разработать. Исследования необходимо направлять, прежде всего, на создание качественной и здоровой среды обитания людей, а также на получение определенных конкурентных преимуществ для европейской индустрии климатического оборудования.

2. Воздух является переносчиком многих видов загрязняющих веществ (газообразные, биологические загрязнения и т.д.). При все более плотной застройке и большей герметичности зданий качество внутреннего воздуха требует особого внимания. Для правильной интерпретации поведения внутреннего воздуха и определения его характеристик требуется дальнейшее изучение, начатое в скандинавских странах, взаимодействия между частицами газообразных или биологических загрязняющих веществ с другими веществами и с твердыми пористыми материалами при воздействии влаги или других факторов.

Кроме этого, следует отметить, что в работе не только затронуты теоретические и научные вопросы, но и намечены перспективные практические пути реализации. Например, было отмечено, что обычно проектирование и строительство зданий осуществляется одними компаниями, а эксплуатация – другими. В результате такой схемы появляется пробел в передаче информации. Основным критерием выбора инженерного оборудования и систем, как правило, являются низкие капитальные затраты, что не всегда обеспечивает низкие эксплуатационные затраты и энергопотребление. Необходимо переходить на другую схему: одна компания должна следить за повышением эффективности здания за все время его жизненного цикла. Такой подход требует новых разработок в области технологии, мониторинга и спецификаций.

Вслед за публикацией приоритетных направлений для повышения энергоэффективности зданий в Европе состоялся форум REHVA. Результаты форума REHVA по стандартам в области вентиляции опубликованы в журнале АВОК [8].

Форум был посвящен необходимости разработки руководящих принципов и стандартов по вентиляции в Европе, т. к. существующих стандартов недостаточно для работы проектировщика.

В ходе обсуждения были сделаны следующие выводы:

1) существует доказательство того, что вентиляция влияет на проявление синдрома больного здания;
2) результаты научных исследований указывают на преимущество вентиляции с большей интенсивностью, до 25 л/с (90м^3/час) на человека;
3) результаты научных исследований указывают на большой разброс «оптимальной» интенсивности вентиляции для различных зданий в зависимости от многих факторов, таких как, например, источники загрязнения от самих строительных материалов;
4) хотя двухкомпонентный метод (выделение вредностей от людей внутри здания и от строительных материалов) расчета интенсивности вентиляции применяется в европейских стандартах (EN15251 indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings – addressing indoor air quality thermal environment, lighting and acoustics) [8], требуется дополнительное научное доказательство, поддерживающее этот подход;
5) воздействие вентиляции на здоровье людей зависит также от качества наружного воздуха;
6) очень сложно разработать критерии производительности вентиляции, основанные на качестве воздуха, в условиях, когда трудно собрать исходные данные (данные по выбросам и т.п. обычно недоступны);
7) необходимо ответить на вопрос, нужны ли стандарты по системам вентиляции и критерии для разных групп людей (аллергиков и т.д.);

8) большинство стандартов основано на перемешивающей схеме вентиляции (mixing ventilation), но некоторые позволяют учитывать эффективность вентиляции и персональную вентиляцию, однако такая возможность не реализуется на практике;
9) достигнуто общее согласие: на данный момент нет достаточной информации для расчета стандартов вентиляции исходя из ее влияния на здоровье людей, но можно подготовить руководства и стандарты, которые помогут повысить эффективность вентиляции.

Кроме того, сделан вывод, что в жилых зданиях интенсивность вентиляции должна зависеть от числа людей в комнате, и на самом деле нужны адаптируемые уровни вентиляции. Необходимо управление вентиляцией по потребности в каждом помещении. Вентиляция должна регулироваться по количеству людей и источникам загрязнения в помещении.

В части того, что не хватает в стандарте по вентиляции:

1) необходимо руководство по простому техническому обслуживанию и эксплуатации вентиляционных систем;
2) необходимо учитывать сильно загрязненный наружный воздух и, соответственно, корректировать вентиляцию или учитывать очистку вентиляционного воздуха;
3) необходимо учитывать наружный климат (влажный/сухой) и, возможно, корректировать вентиляцию;
4) необходимо руководство по контролю вентиляции по потребности;
5) проблема с шумом решается в стандартах, но не на практике – нужны более жесткие критерии по уровню шумов;
6) необходимо разработать обучающие инструкции для людей, находящихся в зданиях.

Критерии эффективности различных систем вентиляции (механической, гибридной и естественной) должны быть одинаковыми, но нужны различные стандарты проектирования. Критерии производительности должны основываться на общей концентрации некоторых загрязняющих веществ и, возможно, на максимальной концентрации других. Многие исследования указывают на более высокую частоту проявления симптомов больного здания в зданиях с механической вентиляцией[1], но причина все еще не ясна. Нет понимания, как учесть это различие. Окончательный вывод: необходимо работать над улучшением руководящих принципов и стандартов в области вентиляции, и REHVA должна проявить инициативу в этой области.

Таким образом, позиция стран Евросоюза по обеспечению качества воздуха в помещении понятна: при недостатке информации по влиянию воздуха на организм человека делаются попытки скорректировать стандарты таким образом, чтобы не допустить ухудшения качество воздуха в помещении. Такие действия позволяют выиграть время, необходимое для научных исследований, и уже на основе полученных результатов привести эти стандарты в соответствие с физиологическими нормами.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что для профилактики различных заболеваний, которые могут возникать в результате отрицательного воздействия воздуха на организм человека, создание и внедрение эффективных систем климатизации зданий становится жизненно необходимым условием.

Литература

1. Гошка Л.Л. Климатические системы: влияние воздуха на клеточные функции. // Инженерно-строительный журнал, №62009. СПб, 2009.
2. Л.Н. Гумилёв, Этногенез и биосфера Земли. М.: Айрис-пресс, 2008.
3. Коррозия теплообменников: агрессивное влияние импортного гипсокартона? http://leacond.dp.ua/news/interesting/full/0/2066/
4. Гошка Л.Л. Разрушение строительных материалов с точки зрения метода кристаллизации в гелях //Инженерно-строительный журнал, №3/2009. СПб, 2009.
5. Москвичи пережили самую грязную ночь лета// http://www.gzt.ru/topnews/weather/256917.html
6. Шилькрот Е.О., Губернский Ю.Д. Сколько воздуха нужно человеку для комфорта? // Журнал АВОК, №4/2008.
7. Аллард Ф. Приоритетные направления для повышения энергоэффективности зданий в Европе. // Журнал Энергосбережение, №5/2008.
8. США – Европа разногласия остаются. // Журнал АВОК, №5/2009.

**Леонид Леонидович Гошка, г. Сыктывкар*
Тел. раб.: +7 (8212) 29-10-24, факс: +7 (8212) 24-44-10; эл. почта: tookola@mail.ru

[1] При использовании рециркуляции в этих системах и в отсутствие глубокой очистки рециркуляционного воздуха общеобменной системе вентиляции обеспечить качество воздуха в помещении невозможно. Влиять также могут загрязненные фильтры, образующие с воздухом двухфазную систему. Причиной может быть загрязненность системы воздухораспределения. Особым источником загрязнения может быть теплообменник секции охлаждения и поддон, т.е. те места в системе, где может образовываться гидрогель.

Применение ультразвукового метода для оценки зоны повреждения железобетона после пожара

Старший преподаватель, аспирант А.В. Улыбин*;
инженер С.Д. Федотов,
ГОУ «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Пожары относятся к наиболее часто встречающимся стихийным бедствиям, приводящим к значительным повреждениям, а иногда и полному уничтожению строительных конструкций. В зависимости от интенсивности и продолжительности огневого воздействия конструкции из разных строительных материалов получают повреждения разной степени, вплоть до полного разрушения.

Железобетон состоит из двух разнородных материалов: бетона и стальной арматуры, имеющих разные физико-механические характеристики. Температура нагрева бетонных элементов по их толщине не является постоянной. Это создает сложности при определении характеристик бетона в различных его слоях.

При нагреве бетона свыше 60 ^{0}С происходит необратимое снижение его механических характеристик (предела прочности, модуля деформации)

При огневом воздействии пожара происходит также снижение сцепления бетона с арматурой, что снижает несущую способность железобетонного элемента и повышает его деформативность. Так, абсолютная деформация удлинения арматурного стержня, не имеющего сцепления с бетоном, в 1,5 раза больше деформации удлинения стержня, имеющего сцепление с бетоном по всей его длине.

При значительном уменьшении сцепления бетона с арматурой может произойти проскальзывание последней и разрушение изгибаемого элемента по наклонному сечению.

При нагреве арматуры из сталей классов А-I, А-II, А-III, до температуры 700 ^{0}С и последующем её охлаждении сохраняется её первоначальный предел текучести [1].

Можно сделать вывод, что при нагреве до температуры 500 ^{0}С и охлаждении обычных железобетонных элементов, в которых использована арматура из сталей классов А-I, А-II, А-III , предел текучести арматуры, а следовательно, и её расчетное сопротивление, остается первоначальным.

Согласно имеющимся нормативам [2], прочность бетона, температура нагрева которого превысила 500 ^{0}С, принимается равной нулю. Однако в действительности следует иметь в виду, что из-за неравномерности распределения температур по глубине сечения конструкций, максимальный нагрев имеет только наружный (подверженный огневому воздействию) слой. В издании [3] приведены изотермы распределения температур по сечению ж/б балки, полученные по результатам расчета (рис. 1). Как видно по рисунку, при нагреве поверхности до 600 ^{0}С (при длительности огневого воздействия 20 мин) на глубине, равной толщине защитного слоя, температура бетона конструкции уменьшится в 2 раза.

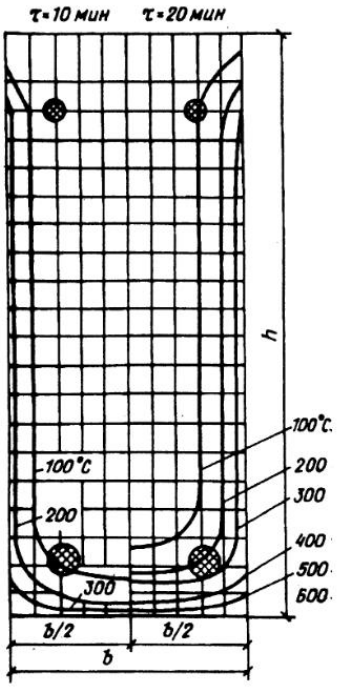


Рисунок 1. Распределение температур нагрева бетона по поперечному сечению балки при времени огневого воздействия 10 и 20 мин

Фактический нагрев конструкций во время пожара, а также реальное распределение температур по зданию (помещению), в котором произошло возгорание, неизвестно. О площади поврежденной зоны и степени (глубине) повреждения в ходе обследования судят по косвенным визуальным признакам, таким как наличие участков обрушения, изменение цвета бетона, налеты сажи и т.п. Поэтому определение реальной зоны повреждения, а также фактической глубины повреждения бетона конструкций является наиболее актуальной задачей.

В ходе обследования конструкций в здании, расположенном по адресу: г. Санкт-Петербург, Невский пр., д. 55, выполненного специалистами ГОУ СПбГПУ и ПНИПКУ «Венчур» в январе-феврале 2009 года, вышеуказанная задача была одной из основных.

По информации, указанной в «Акте о пожаре», а также свидетельству очевидцев, установлено, что возгорание началось 25 декабря около $20^{\underline{00}}$ (согласно времени сообщения о пожаре). Пожар был ликвидирован заливкой воды к $22^{\underline{42}}$ 25 декабря. Причина возгорания, его длительность и максимальная температура в Акте указаны не были.

По визуальным признакам в результате огневого воздействия были повреждены следующие конструкции, выполненные из монолитного железобетона:

- колонны 2 этажа;
- балки перекрытия над 2 этажом;
- плита перекрытия над 2 этажом.

Предположительная максимальная температура нагрева бетона конструкций около 800-900 ^{0}С была установлена по следующим косвенным признакам:

- цвет бетона – серый;
- части колонн и большая часть перекрытия покрыты сажей;
- имеются отслаивания защитного слоя бетона и его обрушение;
- бетон колонн откалывается молотком по углам сечения на глубину до 20 мм;
- поверхность бетона покрыта сеткой неглубоких температурно-усадочных трещин.

Наиболее существенными повреждениями, снижающими несущую способность конструкций, являлись:

1) образование поперечных трещин, а также сетки трещин в защитном слое бетона балок раскрытием до 0,3 мм;
2) образование сетки трещин в защитном слое бетона колонн и перекрытия раскрытием до 0,3 мм;
3) обрушение защитного слоя бетона перекрытия с обнажением рабочей арматуры нижней сетки на площади ≈ 310 м$^{2;}$
4) деформация и отслоение арматуры плиты перекрытия с последующим прогибом до 5 см.

Для решения задачи по выяснению фактической площади повреждения плиты перекрытия были выполнены измерения скорости прохождения ультразвуковых волн (УЗВ) сквозь плиту. Измерения производились как в зоне с наличием визуально определимых дефектов (скол защитного слоя, сажа и т. п.), так и за ее пределами. В ходе исследований измерения были проведены в 60 точках, расположенных с шагом 3,0 м на поверхности плиты перекрытия.

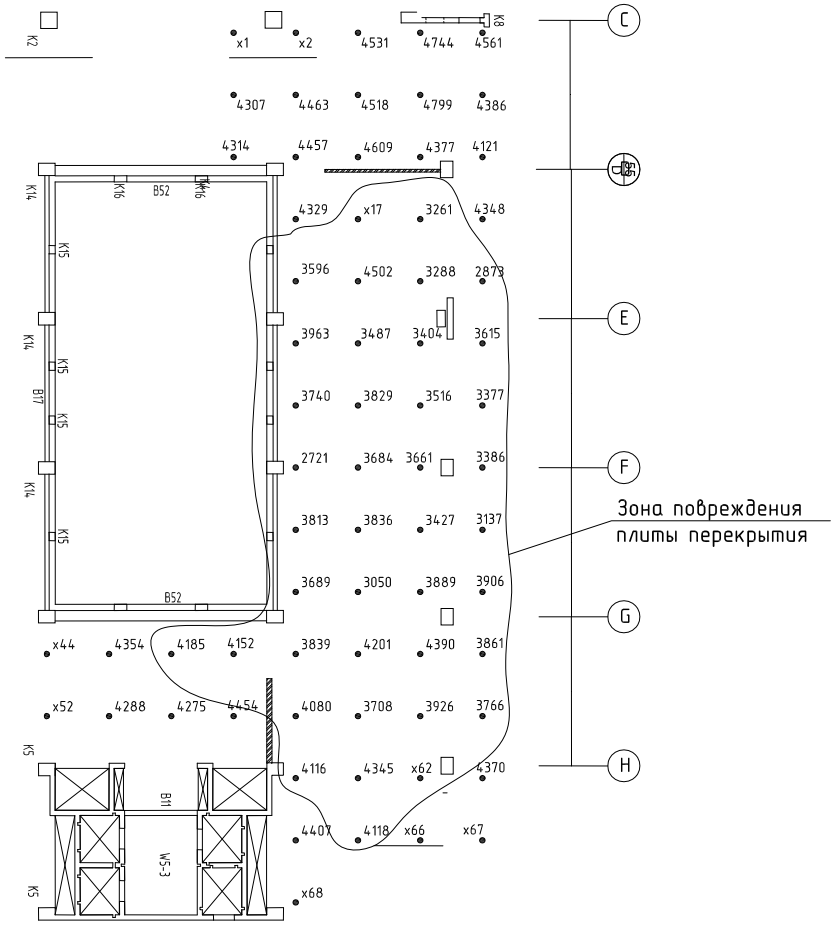


Рисунок 2. План расположения точек измерения на плите перекрытия с указанием скорости УЗВ и определенной зоны повреждения

Работы выполнялись с помощью ультразвукового прибора Пульсар 1.1 производства НПП «Интерприбор». Сквозное прозвучивание осуществлялось соосным приложением датчиков прибора с нижней и верхней стороны плиты. Для определения расположения точек с обратной поверхности плиты, а также обеспечения их соосности в каждом исследуемом участке осуществлялось бурение сквозного вертикального отверстия диаметром 10 мм. В этом же отверстии определялась и фактическая толщина перекрытия для каждой точки измерения. Для определения отсутствия арматуры в точке измерения (бурения отверстия) применялся магнитный метод по ГОСТ 22904-93. Отношение определенной толщины перекрытия в каждой точке к времени распространения УЗВ, которое измеряется прибором, дало значение скорости УЗВ.

Известно, что прочность бетона находится в тесной связи со скоростью распространения УЗВ в нем, что и используется в ходе неразрушающего контроля прочности по ГОСТ 17624-87. Наличие дефектов в толще бетона, таких как трещины, расслоения, не провибрированные зоны также существенно сказывается на величине скорости УЗВ, которая при наличии дефектов резко снижается.

Два данных обстоятельства и легли в основу применимости данного метода в исследовании.

По результатам измерений было выявлено, что в поврежденной зоне вокруг очага возгорания скорость УЗВ в бетоне имела величины от 2700 до 4300 м/с. Вне зоны повреждения скорость УЗВ имела среднее значение 4500 м/с. По результатам измерений была выделена поврежденная зона перекрытия (рис. 2).

Для решения второй поставленной задачи, а именно определения глубины повреждения бетона конструкций, произведено выбуривание кернов диаметром 75-100 мм из плиты перекрытия, колонн и балок. Отбор кернов произведен в 10 участках из плиты, в 7 из балок и в 12 из колонн. Точки отбора кернов располагались как на конструкциях, имеющих визуальные признаки повреждения, так и на неповрежденных.

Для каждого керна произведено измерение скорости УЗВ поперек сечения (по диаметру) в нескольких точках, расположенных по его высоте от зоны огневого воздействия к противоположной стороне (рис. 3). Оценка глубины повреждения произведена по аномальному снижению скорости. Графики, построенные по результатам исследования некоторых образцов, представлены на рис. 4, 5.

Рисунок 3. Лабораторное измерение скорости УЗВ по диаметру кернов

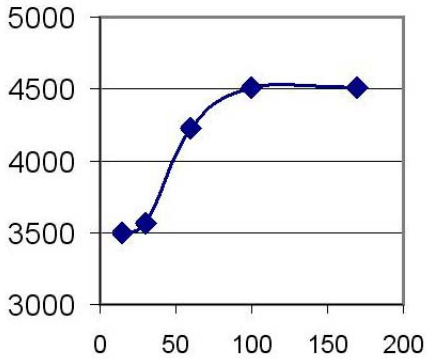


Рисунок 4. График зависимости скорости УЗВ (по оси ординат в м/с) по длине керна (по оси абсцисс в мм), отобранного из поврежденного участка конструкции

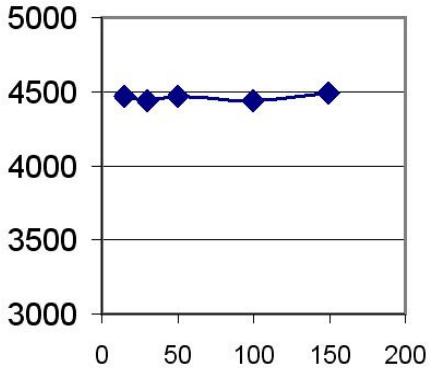


Рисунок 5. График зависимости скорости УЗВ (по оси ординат в м/с) по длине керна (по оси абсцисс в мм), отобранного из неповрежденного участка конструкции

По результатам измерений установлено, что на большинстве кернов скорость УЗВ у поврежденной поверхности имеет минимальные значения (около 3500-4000 м/с). При удалении исследуемого сечения от зоны повреждения скорость возрастает, и в неповрежденной зоне для большинства образцов составляет 4500 м/с (см. рис. 4). В кернах, отобранных из неповрежденных конструкций, скорость УЗВ по сечению менялась несущественно и составляла в среднем также 4500 м/с (см. рис. 5).

По результатам исследований установлено, что максимальная глубина повреждения бетона конструкций (колонн, плиты и балок) составляет 50 мм от поверхности.

Выводы

1. Применение ультразвукового метода для оценки зоны повреждения бетона позволяет количественно оценить зоны повреждения конструкций и глубину поврежденного бетона.

2. При использовании ультразвукового метода можно проводить измерения в кратчайшие сроки с большой достоверностью.

3. Трудоемкость метода в сочетании со стоимостью применяемого оборудования гораздо ниже, чем у альтернативных методов, таких как дефектоскопия или петрографическое исследование шлифов.

Литература

1. Гроздов В.Т. Определение остаточной несущей способности строительных конструкций, подвергшихся огневому воздействию при пожарах, и рекомендации по их использованию. СПб.: ООФ «ЦКС».-2008.-78с.

2. СП 13-102-2003. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. М.: ГОССТРОЙ России.-2004.- 26 с.

3. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. М.: Стройиздат.-1998.-300с.

** Алексей Владимирович Улыбин, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812)535-57-82; эл. почта: ulybin@mail.ru

Расчет конструкций промышленных полов с учетом динамического воздействия нагрузок от перемещения грузоподъёмного транспорта

Доцент И.А. Войлоков*,
ГОУ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет;
генеральный директор А.М. Горб,
ООО «Конкрит инжиниринг»

Интенсивное перемещение подъёмно-транспортного оборудования является характерным для большинства современных промышленных объектов. При этом данные воздействия часто являются определяющими при расчёте и конструировании промышленных полов. Авторами статьи были проведены теоретические исследования, в результате которых были получены соответствующие решения и формулы, а также обоснована необходимость учёта данных воздействий при конструировании полов, в том числе, с использованием решений динамической задачи теории упругости.

Особенностью решения данной задачи, в отличие от статической, является необходимость учета сил инерции, являющихся функциями массы рассматриваемой (рассчитываемой) плиты пола и её ускорений при воздействии многократно повторяющихся подвижных (динамических) нагрузок с учётом наличия подстилающего упругого основания. При динамическом расчете расчетная модель назначается с учётом необходимой точности решения, которая соответствует системе с бесконечным числом степеней свободы, которая приводит к необходимости интегрирования неоднородного дифференциального уравнения в частных производных, так как перемещения точек плиты являются функциями координат и времени:

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}\right)+m\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}-p(x,y)=g(x,y,t), \quad (1)$$

где D – цилиндрическая жесткость плиты;
w – прогиб плиты;
x, y – координаты срединной плоскости плиты;
m – масса плиты;
$m\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}$ – силы инерции плиты;
$p(x, y)$ – реактивный отпор основания;
$g(x,y,t)$ – нагрузка.

Рассмотрим решение уравнения (1) для случая движения нагрузки, распределенной по площади малого (по сравнению с размерами плиты) прямоугольника, по плите неограниченных размеров. Для упрощения примем в качестве расчётной винклеровскую одноконстантную модель основания (модель местных упругих деформаций). Использование других моделей (например, упругого полупространства) в данном случае возможно путём соответствующего приведения упругой характеристики гибкости плиты к одноконстантной модели с использованием вместо значения коэффициента постели статического или динамического модуля деформации (упругости) грунта.

Определение усилий в рассматриваемой плите при действии нескольких нагрузок может быть произведено с помощью принципа суперпозиции нагрузок. Введем вместо неподвижных координат x и y (в случае рассмотрения статических нагрузок) подвижные ξ и η, движущиеся вместе с нагрузкой с постоянной скоростью v (рис. 1). Тогда получим:

$$\xi = x - v_x t; \quad \eta = y - v_y t, \quad (2)$$

где: v_x, v_y – проекции скорости на оси координат x и y; t – время.

Произведя замену переменных x и y в уравнении (1) на ξ и η, получим:

$$D\left(\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^2\partial \eta^2}+\frac{\partial^4 w}{\partial \eta^4}\right)+m\left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2}v_x^2+2\frac{\partial^2 w}{\partial \xi\partial \eta}v_x\right)v_y+\frac{\partial^2 w}{\partial \eta^2}v_y^2+cw=p(\xi;\eta) \quad (3)$$

Согласно этому методу, если *φ(x, y)* и ее частные производные есть непрерывные функции, равные нулю в бесконечности, то для трансформанта Фурье

$$E_{\varphi(\alpha,\beta)} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\varphi(x,y)e^{i(\alpha x+\beta y)}dxdy \quad (4)$$

существует обратное преобразование:

$$\varphi(x,y) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}E_{\varphi(\alpha,\beta)}e^{-i(\alpha x+\beta y)}d\alpha d\beta . \quad (5)$$

Уравнение (3) умножаем на $\frac{1}{2\pi}\ e^{i(\alpha x+\beta y)}$ и, интегрируя по всей плоскости, получаем:

$$D(\alpha^2+\beta^2)E_{(\alpha,\beta)} - m(v_x\alpha+v_y\beta)^2E_{(\alpha,\beta)} +$$

$$+cE_{(\alpha,\beta)} = E_{p(\alpha,\beta)}. \quad (6)$$

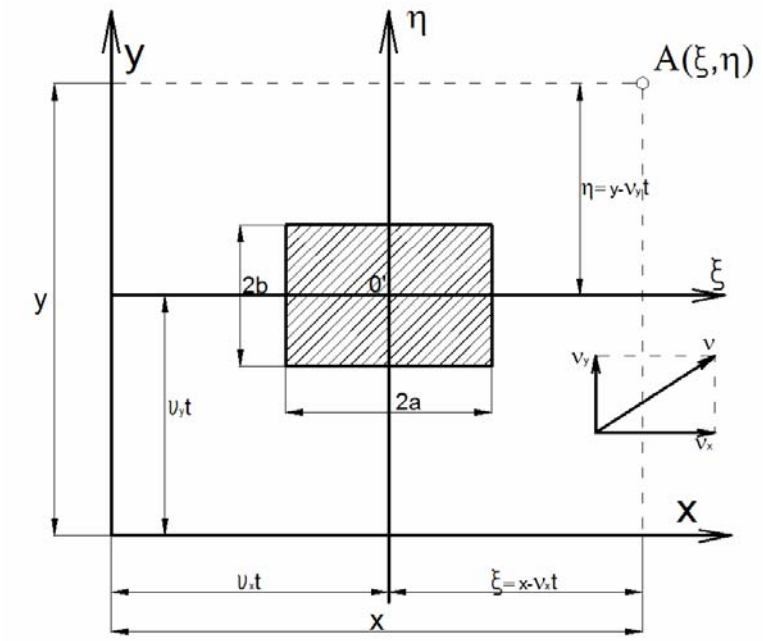


Рисунок 1. Расчётная схема для определения динамического воздействия подвижной нагрузки

Откуда:

$$E_{(\alpha,\beta)} = \frac{E_p(\alpha,\beta)}{c-m(v_x\alpha+v_y\beta)^2+D(\alpha^2+\beta^2)^2}d\alpha d\beta \quad (7)$$

Используя выражение (5), получаем:

$$w_{\xi,\eta} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{E_{p(\alpha,\beta)}e^{-i(\alpha\xi+\beta\eta)}}{c-m(v_x\alpha+v_y\beta)^2+D(\alpha^2+\beta^2)^2}d\alpha d\beta \quad (8)$$

Если принять, что $v_y = 0$ – нормальный режим движения транспортного средства ($-v_x = v$), а $p(\xi;\eta)$ соответствует нагрузке, равномерно распределенной по прямоугольнику со сторонами *2a* и *2b* с интенсивностью *q*, то после ряда преобразований получим выражения для прогибов плиты и изгибающих моментов:

$$w_{(\xi,\eta)} = \frac{4q}{\pi^2}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\frac{\cos\alpha\xi\cos\beta\eta\sin\alpha a\sin\beta b d\beta}{\alpha\beta\left[c-mv^2\alpha^2+D(\alpha^2+\beta^2)^2\right]}$$

$$M_\xi = \frac{4qD}{\pi^2}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\frac{(\alpha^2+\beta^2\mu)\sin\alpha a\sin\beta b\cos\alpha\xi\cos\beta\eta d\alpha d\beta}{\alpha\beta\left[c-mv^2\alpha^2+D(\alpha^2+\beta^2)^2\right]} \quad (9)$$

$$M_\eta = \frac{4qD}{\pi^2}\int_0^{\infty}\int_0^{\infty}\frac{(\mu\alpha^2+\beta^2)\sin\alpha a\sin\beta b\cos\alpha\xi\cos\beta\eta d\alpha d\beta}{\alpha\beta\left[c-mv^2\alpha^2+D(\alpha^2+\beta^2)^2\right]}.$$

С целью получения решения для движущейся сосредоточенной силы *P* необходимо принять условия $a\to 0, b\to 0$, $4abq = P$.

После соответствующих преобразований получим:

$$w_{(\xi,\eta)} = \frac{P}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{\cos\alpha\xi\cos\beta\eta d\alpha d\beta}{c - mv^2\alpha^2 + D(\alpha^2+\beta^2)^2}$$

$$M_\xi = \frac{PD}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{(\alpha^2+\mu\beta^2)\cos\alpha\xi\cos\beta\eta d\alpha d\beta}{c - mv^2\alpha^2 + D(\alpha^2+\beta^2)^2} \quad (10)$$

$$M_\eta = \frac{PD}{\pi^2}\int_0^\infty\int_0^\infty \frac{(\mu\alpha^2+\beta^2)\cos\alpha\xi\cos\beta\eta d\alpha d\beta}{c - mv^2\alpha^2 + D(\alpha^2+\beta^2)^2}$$

На основании полученных выражений можно вычислить динамические коэффициенты как отношение моментов или прогибов плиты пола при динамической и статической нагрузках (статические моменты и прогибы вычисляются по формулам (9), (10), при условии, что $v = 0$).

Для многих практических задач можно удовлетвориться приближенным решением, рассматривая плиту как систему с несколькими степенями свободы. Наиболее простой моделью для приближенного решения динамической задачи будет система с одной степенью свободы, которая дает приемлемую точность.

Дифференциальное уравнение движения для системы с одной степенью свободы имеет вид:

$$M_П \frac{d^2w}{dt^2} + k\Phi\frac{dw}{dt} + kw = P(t), \quad (11)$$

где M_n – приведенная масса плиты;

w – прогиб плиты;

k – коэффициент жесткости плиты;

Φ – модуль затухания;

$P(t)$ – подвижная нагрузка.

Приведенную массу плиты с присоединенной массой грунта определим из условия, что кинетическая энергия системы, состоящей из плиты с присоединенной массой основания, равняется кинетической энергии сосредоточенной массы, расположенной в заданной точке. Примем условие, что при колебаниях сохраняется одна и та же форма упругой поверхности плиты. Уравнение поверхности выразим так:

$$w_{(x,y)} = w_{max}\varphi_{(x,y)}\sin p(t-\alpha), \quad (12)$$

где $w_{(x,y)}$ – прогиб в произвольной точке с координатами x и y;

w_{max} – максимальный прогиб; α – угол, определяемый начальными условиями.

Условие равенства кинетической энергии плиты с присоединенной массой основания кинетической энергии сосредоточенной массы запишем следующим образом:

$$U_{пл} + U_{осн} = U_{пр}, \quad (13)$$

где $U_{пл}$ – кинетическая энергия плиты с распределенной массой;

$U_{осн}$ – кинетическая энергия присоединенного грунтового основания;

U_n – кинетическая энергия приведенной сосредоточенной массы.

Выражения для определения $U_{пл}$, $U_{осн}$, $U_{пр}$ имеют вид:

$$U_{пл} = \frac{1}{2}\int_0^l\int_0^l \lambda_n h(w')^2\,dxdy$$

$$U_{осн} = \frac{1}{2}\int_0^l\int_0^l\int_0^l \lambda_r h(w'\frac{z}{h_0})^2\,dxdydz \quad (14)$$

$$U_{пр} = \frac{1}{2}M_п(w')^2,$$

где l – длина плиты (для бесконечных плит – диаметр чаши прогиба или удвоенное значение упругой характеристики плиты);

λ_n – масса плиты, отнесенная к единице объема;

λ_r – масса единицы объема грунтового основания;

h – толщина плиты;

h_o – глубина деформируемого слоя;

z – ордината точки, расположенной на произвольной глубине.

Подставляя выражение (14) в равенство (13), для упрощения заменяя прямоугольные координаты полярными и производя необходимые преобразования, получаем:

$$M_n = 4\lambda_n h\int_0^{\pi/2}\int_0^R [2f_0(\xi)]^2 rdrd\varphi + \frac{4\lambda_0}{h_0^2}\int_0^{\pi/2}\int_0^R\int_0^{h_0}[2f_0(\xi)]^2 z^2 dzdrd\varphi \quad (15)$$

Обозначив R = 3,8, $l = \sqrt[4]{\frac{D}{c}}$ и через $f_0(\xi)$ – функцию Бесселя, окончательно получим:

$$M_n = 3{,}76l^2\left(\lambda_n h + \frac{1}{3}\lambda_0 h_0\right) \quad (16)$$

Коэффициент жесткости плиты k выражает усилие, необходимое для создания единичного перемещения. Он может быть выражен величиной, обратной прогибу плиты:

$$k = 2{,}4\sqrt{cE_б h^3}, \quad (17)$$

где c – коэффициент постели грунта; $E_б$ – модуль упругости бетона; h – толщина плиты.

Модуль затухания Φ характеризует влияние неупругих сопротивлений грунта и определяется опытным путем (значение Φ меняется от 0,003 до 0,010 в зависимости от вида грунтов). Чтобы определить нагрузку $P(t)$, переменную во времени, воспользуемся методом приведенных сил. Для этого быстро перемещающуюся по плите нагрузку заменим одной неподвижной силой в центре приведения, но меняющей свое значение во времени. Закон изменения приведенной силы во времени определим из условия, что статическое перемещение центра приведения в любое мгновение от любой силы при её фактическом для данного мгновения положения на плите равняется перемещению такого же центра от приведенной силы с соответственно подобранным значением. Принимая значение прогиба центра плиты при любом расположении нагрузки в виде одной полуволны – синусоиды, получим:

$$P(t) = P\sin mt \quad (18)$$

$$m = \pi v / l,$$

где m – частота вынужденных колебаний плиты заданной жёсткости;

v – скорость движения нагрузки;

l – то же, что и в формуле (14).

При расчетах конструкций плит учитывают максимальные значения прогибов и усилий, то есть начало колебательного процесса, а не конец. Поэтому при выполнении практических расчетов влияние неупругих сопротивлений грунта можно не учитывать. С учетом такого допущения интеграл дифференциального уравнения (11) может быть определен следующими формулами:

- при $mt_1 < \pi$ (нагрузка движется по плите)

$$w = w_{cm}^{max} \frac{P}{p^2 - m^2} (p \sin mt - m \sin pt) \quad (19)$$

- при $mt_1 > \pi$ (нагрузка сошла с плиты)

$$w = w_{cm}^{max} \frac{P}{p^2 - m^2} \{[p \sin mt - m \sin pt] + [p \sin m(t - t_1) - m \sin p(t - t_1)]\}, \quad (20)$$

где $p = \sqrt{\frac{k}{M_П}}$ – частота собственных колебаний плиты;

$w_{cm}^{max} = \frac{P}{p^2 M_П}$ – прогиб плиты при статической нагрузке *P*.

По формулам (19) и (20) можно определить коэффициент динамичности как отношение прогибов покрытий при динамической и статической нагрузках.

Формулы для коэффициентов динамичности в зависимости от $\beta = p/m$, т.е. от соотношения частот собственных *p* и вынужденных *m* колебаний, а также от характера колебаний плиты будут следующие:

1) свободные колебания $\beta < 1$: $k_Д = \frac{2\beta}{1 - \beta^2} \cos \frac{\beta\pi}{2}$;

2) вынужденные колебания $\beta = 1$: $k_Д = \pi/2$ (21);

3) вынужденные колебания $\beta = 1 \div 3$: $k_Д = \frac{\beta}{\beta - 1} \sin \frac{2\pi}{\beta + 1}$;

4) вынужденные колебания $\beta > 3$: $k_Д = \frac{\beta}{\beta - 1}$.

Для практических расчетов с достаточной точностью можно применять решения для системы и с одной степенью свободы. Суммарное воздействие подвижной нагрузки будет определяться коэффициентом динамичности.

Литература

1. Бондаренко С.В. Теория сопротивления конструкций режимным нагружениям. М.,1984.
2. Белов В.В., Васильев П.И. Пространственная блочно-контактная модель деформирования железобетонных оболочек и плит с трещинами // Пространственные конструкции зданий и сооружений-Вып.7. М.,1991.
3. Лехницкий С.Г.Теория упругости анизотропного тела. М., 1977.
4. Муращев В.И. Трещиностойкость, жесткость и прочность железобетона. М., 1988.

**Илья Анатольевич Войлоков, Санкт-Петербург*

Тел. моб.: +7(921)944-52-99; эл. почта: ilya@voilokov.ru

Математические модели деформирования ортотропных и изотропных ребристых оболочек при учете ползучести материала

К.т.н. В.М. Жгутов*,
ООО «Архитектурно-строительная компания «Китеж»

Известно, что при исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) и устойчивости оболочек, находящихся под действием длительных нагрузок, необходимо учитывать, что с течением времени в материале проявляется свойство ползучести, что приводит к снижению реальной несущей способности оболочек, найденной при упругом поведении материала.

Ползучесть материалов является важнейшим реологическим свойством твердых тел. Оно заключается в том, что под действием длительных нагрузок с течением времени происходит медленный непрерывный рост деформации (даже при постоянных напряжениях).

Рассматриваем оболочки общего вида, подразумевая достаточно широкий класс оболочек наиболее распространенных частных видов: пологих на прямоугольном плане и вращения (в частности, цилиндрических, конических, сферических, торообразных), а также других оболочек.

Срединную поверхность оболочки (точнее, ее обшивки) толщиной *h* принимаем за отсчетную поверхность *z*=0.

Полагаем, что оси *x* и *y* криволинейной ортогональной системы координат ($0 \le x \le a, 0 \le y \le b$) направлены по линиям кривизны срединной поверхности (параллелям и меридианам в случае оболочки вращения), а ось *z* – по нормали к поверхности *z* = 0 в сторону ее вогнутости.

Со стороны вогнутости оболочка подкреплена ребрами жесткости, расставленными вдоль координатных линий. Ребра задаем дискретно с помощью функции $H = H(x, y)$, характеризующей распределение ребер по оболочке и их высоту [1, 2].

Таким образом, толщина всей конструкции равна $h + H$ и $-h/2 \le z \le h/2 + h$.

Считаем, что оболочка находится под действием механической нагрузки при определенном закреплении ее контура.

Будем учитывать геометрическую нелинейность, дискретное расположение ребер, их ширину, сдвиговую и крутильную жесткости ребер, поперечные сдвиги.

Как известно, математическая модель деформирования оболочки включает в себя:

- геометрические соотношения (связь деформаций и перемещений);
- физические соотношения (связь напряжений и деформаций);
- функционал полной энергии деформации оболочки, из условия минимума которой могут быть получены уравнения устойчивого равновесия или движения данной оболочки.

1. Геометрические соотношения для ребристых оболочек при больших перемещениях

Геометрические соотношения в срединной поверхности *z* = 0 получаются с помощи операции ковариантного дифференцирования векторного поля перемещений и с учетом геометрической нелинейности имеют вид

$$\varepsilon_x = \frac{1}{A}\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{AB}\frac{\partial A}{\partial y}V - K_x W + \frac{1}{2}\theta_1^2;\ \varepsilon_y = \frac{1}{B}\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{AB}\frac{\partial B}{\partial x}U - K_y W + \frac{1}{2}\theta_2^2;$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{A}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{B}\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{1}{AB}\left(\frac{\partial A}{\partial y}U + \frac{\partial B}{\partial x}V\right) + \theta_1\theta_2,$$

где ε_x, ε_y и γ_{xy} – деформации удлинения вдоль осей *x*, *y* и, соответственно, сдвига в касательной плоскости (*dx*,*dy*); *U*, *V* и *W* – компоненты вектора перемещений (перемещения) точек вдоль осей *x*, *y* и *z* соответственно; *A* и *B* – метрические коэффициенты Ламе, зависящие от вида оболочки (например, *A*=*B*=1 для пологой оболочки и *A*=*const*, *B*=*B*(*x*) в случае оболочки вращения); $K_x = 1/R_1$, $K_y = 1/R_2$ – главные кривизны (R_1, R_2 – главные радиусы кривизны) оболочки вдоль осей *x* и *y* соответственно;

$$\theta_1 = -\left(\frac{1}{A}\frac{\partial W}{\partial x} + K_x U\right);\ \theta_2 = -\left(\frac{1}{B}\frac{\partial W}{\partial y} + K_y V\right).$$

В указанных соотношениях квадратичные члены (от угловых перемещений) характеризуют геометрическую нелинейность, которую следует учитывать в случаях, когда квадратом длины вектора перемещений нельзя пренебречь в сравнении с его длиной [в частности, когда поперечные перемещения *W* (прогибы) соизмеримы с толщиной оболочки *h*].

Деформации поперечных сдвигов определяем по формулам

$$\gamma_{xz} = k f(z)(\psi_x - \theta_1);\ \gamma_{yz} = k f(z)(\psi_y - \theta_2).$$

Здесь ψ_x и ψ_y – углы поворота отрезка нормали в плоскостях (*dx,dz*) и (*dy,dz*) соответственно; *f*(*z*) – функция, характеризующая распределение напряжений τ_{xz} и τ_{yz} вдоль оси *z*; *k* – константа.

Будем полагать, что материалы обшивки и ребер имеют одинаковые (или близкие) сдвиговые жесткости. Тогда функция что *f*(*z*) может быть принята в виде [1, 2]

$$f(z) = -\frac{6}{(h+H)^2}\left(z + \frac{h}{2}\right)\left(z - \frac{h}{2} - H\right).$$

Эта функция при $z = -h/2$ и $z = h/2 + H$ обращается в нуль и удовлетворяет условиям

$$\frac{1}{h+H}\int_{-h/2}^{h/2+H} f(z)dz = 1;\ \frac{1}{h+H}\int_{-h/2}^{h/2+H} f^2(z)dz = \frac{1}{k} \qquad (k = 5/6).$$

Перемещения в слое $z \neq 0$ определяем по формулам

$$U^z = U + z\psi_x,\ V^z = V + z\psi_y,\ W^z = W,$$

откуда для деформаций в слое $z \neq 0$ получаем соотношения в виде

$$\varepsilon_x^z = \varepsilon_x + z\chi_1,\ \varepsilon_y^z = \varepsilon_y + z\chi_2,\ \gamma_{xy}^z = \gamma_{xy} + 2z\chi_{12},$$

где χ_1, χ_2 и χ_{12} – функции изменения кривизны и кручения, определяемые, как легко видеть, по формулам:

$$\chi_1 = \frac{1}{A}\frac{\partial \psi_x}{\partial x} + \frac{1}{AB}\frac{\partial A}{\partial y}\psi_y;\ \chi_2 = \frac{1}{B}\frac{\partial \psi_y}{\partial y} + \frac{1}{AB}\frac{\partial B}{\partial x}\psi_x;$$

$$2\chi_{12} = \frac{1}{A}\frac{\partial \psi_y}{\partial x} + \frac{1}{B}\frac{\partial \psi_x}{\partial y} - \frac{1}{AB}\left(\frac{\partial A}{\partial y}\psi_x + \frac{\partial B}{\partial x}\psi_y\right).$$

2. Физические соотношения для ортотропных и изотропных оболочек при учете ползучести материала

Как известно, в настоящее время существует несколько теорий ползучести, каждая из которых применима для определенного круга материалов в зависимости от многих факторов.

Для металлов (ползучесть в которых развивается только при высоких температурах) обычно пользуются *теорией течения*, которая хорошо описывает ползучесть при напряжениях, изменяющихся монотонно и медленно, но основана на ярко выраженной нелинейной зависимости $d\varepsilon/dt = f(\sigma, t)$.

Более полное описание ползучести дает *теория упрочения*, согласно которой $d\varepsilon/dt = f(\sigma, d\varepsilon/dt)$. Теория упрочения правильно улавливает особенности ползучести при изменяющихся напряжениях и удобна для анализа кратковременной ползучести при высоком уровне напряжений, однако её применение связано с большими математическими трудностями.

В механике полимеров и для бетона (в области эксплутационных значений напряжений $\sigma < 0{,}5\,\sigma_T$ и, соответственно, $\sigma < 0{,}5\,R_{пр}$, где σ_T – предел текучести; $R_{пр}$ – призменная прочность бетона) широко используется линейный вариант *теории наследственности* Больцмана – Вольтерра, основанный на принципе суперпозиции деформаций и учитывающий историю напряженного состояния.

В соответствии с линейной теорией наследственности физические соотношения для изотропного материала в работе В.И. Климанова и С.А. Тимашева [3] записаны в виде

$$\varepsilon_x^z(t)=\frac{1}{E}(\sigma_x-\mu\sigma_y)+\frac{1}{E}\int_{t_0}^{t}(\sigma_x-\mu\sigma_y)K_1(t,\tau)d\tau;$$

$$\varepsilon_y^z(t)=\frac{1}{E}(\sigma_y-\mu\sigma_x)+\frac{1}{E}\int_{t_0}^{t}(\sigma_y-\mu\sigma_x)K_1(t,\tau)d\tau;$$

$$\gamma_{xy}^z(t)=\frac{1}{G_{12}}\tau_{xy}+\frac{1}{G_{12}}\int_{t_0}^{t}\tau_{xy}K_2(t,\tau)d\tau;\quad (1)$$

$$\gamma_{xz}(t)=\frac{1}{G_{13}}\tau_{xz}+\frac{1}{G_{13}}\int_{t_0}^{t}\tau_{xz}K_2(t,\tau)d\tau,$$

$$\gamma_{yz}(t)=\frac{1}{G_{23}}\tau_{yz}+\frac{1}{G_{23}}\int_{t_0}^{t}\tau_{yz}K_2(t,\tau)d\tau,$$

где $K_1(t,\tau)$ и $K_2(t,\tau)$ – суммарные функции влияния (ядра ползучести) при растяжении (сжатии) и сдвиге соответственно; E и μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона материала оболочки; G_{12} = G_{13} = G_{23} = $E/2(1+\mu)$ – модули сдвига.

Обратные к (1) соотношения принимают вид

$$\sigma_x=G_1\left[\varepsilon_x^z+\mu\varepsilon_y^z-\int_{t_0}^{t}(\varepsilon_x^z+\mu\varepsilon_y^z)R_1(t,\tau)d\tau\right];$$

$$\sigma_y=G_2\left[\varepsilon_y^z+\mu\varepsilon_x^z-\int_{t_0}^{t}(\varepsilon_y^z+\mu\varepsilon_x^z)R_1(t,\tau)d\tau\right];$$

$$\tau_{xy}=G_{12}\left[\gamma_{xy}^z-\int_{t_0}^{t}\gamma_{xy}^zR_2(t,\tau)d\tau\right];\ (2)$$

$$\tau_{xz}=G_{13}\left[\gamma_{xz}-\int_{t_0}^{t}\gamma_{xz}R_2(t,\tau)d\tau\right];$$

$$\tau_{yz}=G_{23}\left[\gamma_{yz}-\int_{t_0}^{t}\gamma_{yz}R_2(t,\tau)d\tau\right],$$

где $R_1(t,\tau)$ и $R_2(t,\tau)$ – функции влияния (ядра релаксации) материала при растяжении (сжатии) и сдвиге соответственно, τ – переменная интегрирования (имеющая смысл времени); $G_1=G_2=E/(1-\mu^2)$.

Для полимерных материалов (в частности, оргстекла) функции влияния имеют вид [3]

$$K(t)=\frac{\exp(-\beta t)}{t}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{[A\cdot\Gamma(\alpha)]^n t^{\alpha n}}{\Gamma(\alpha n)};\ R(t)=A\cdot\exp(-\beta t)\cdot t^{\alpha-1},\ (3)$$

где $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция; α, β и A – экспериментальные параметры.

Некоторые значения параметров α, β и A для оргстекла приведены в табл. 1, фрагментарно заимствованной из монографии [3].

Таблица 1. Механические характеристики оргстекла

E, МПа	Функции влияния	Коэффициент функции влияния		
		α	β	A
$0{,}33126\cdot10^4$	K_1, R_1	0,05	$0{,}045\cdot10^{-3}$	0,026945
	K_2, R_2	0,20	$0{,}833\cdot10^{-3}$	0,013184

Современное состояние теории ползучести, наиболее полно учитывающей особенности деформирования бетона, обязано трудам Г.Н. Маслова, Н.Х. Арутюняна, А.А. Гвоздева, И.Е. Прокоповича, И.И. Улицкого, В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко, Р.С. Санжаровского, В.Д. Харлаба и др.

Очень хорошо соответствует опытным данным *теория упругоползучего тела*, основанная на линейном варианте наследственной теории и учитывающая старение бетона [4].

Теория упругоползучего тела (называемая иначе *наследственной теорией старения*) подразумевает следующие известные соотношения для полных деформаций удлинения ε и сдвига γ (уравнения Г.Н.°Маслова – Н.Х. Арутюняна):

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma(t)}{E(t)}-\int_{t_0}^{t}\sigma(s)\frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{1}{E(s)}+C(t,s)\right]ds\,;\ \gamma(t)=\frac{\tau(t)}{G(t)}-\int_{t_0}^{t}\tau(s)\frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{1}{G(s)}+\omega(t,s)\right]ds\,, \quad (4)$$

где t_0 – возраст бетона; $G(t)$ – модуль сдвига; s – переменная интегрирования (время); $C(t, s)$ и $\omega(t, s)$ – меры ползучести бетона при растяжении (сжатии) и сдвиге, причем $\omega(t, s) = 2C(t, s)$.

В правых частях соотношений (4) первые члены представляют собой упругомгновенную деформацию, а вторые (интегральные) – деформацию ползучести.

Соотношение (4) в общем случае можно записать в виде [5]

$$\varepsilon(t)=\frac{\sigma(t)}{E(t)}+\int_{t_0}^{t}\frac{\sigma(s)}{E(s)}K_1(t,s)ds\,;\ \ \gamma\ (t)=\frac{\tau(t)}{G(t)}+\int_{t_0}^{t}\frac{\tau(s)}{G(s)}K_2(t,s)ds\,,$$

где $K_1(t,s)=-E(s)\frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{1}{E(s)}+C(t,s)\right]$; $K_2(t,s)=-G(s)\frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{1}{G(s)}+\omega(t,s)\right]$. (5)

Так как при $t_0 \le s \le t$

$$\frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{1}{E(s)}+C(t,s)\right]<0 \ \text{ и } \ \frac{\partial}{\partial s}\left[\frac{1}{G(s)}+\omega(t,s)\right]<0\,,$$

полные деформации всегда больше упругомгновенных.

Учитывая, что деформации ползучести зависят от возраста бетона в момент приложения нагрузки τ и продолжительности действия нагрузки $t-\tau$, Н.Х. Арутюнян предложил представить меру ползучести бетона $C(t,\tau)$ в виде [4]

$$C(t,\tau)=\varphi(\tau)\cdot f(t-\tau)\,,$$

где $\varphi(\tau)$ – корректирующая функция возраста (описывающая старение в условиях постоянной влажности и температуры), которая по определению убывает монотонно (при увеличении τ), асимптотически стремясь к константе C_0, характеризующей старый бетон; $f(t-\tau)$ – наследственная функция (описывающая рост деформации ползучести со временем), удовлетворяющая неравенству $0 \le f(t-\tau) \le 1$ на промежутке $0 \le (t-\tau) < \infty$.

Например, для относительно старого бетона ($28 \le \tau < 360 сут$) можно принять [4 – 7]:

- по Н.Х. Арутюняну

$$\varphi(\tau)=C_0+A/\tau\,;\ \ f(t-\tau)=1-\exp(-\gamma(t-\tau))\,;$$

- по И.Е. Прокоповичу и И.И. Улицкому

$$\varphi(\tau)=C_0+A\cdot\exp(-\gamma\tau)\,;\, f(t-\tau)=1-\exp(-\gamma(t-\tau))\,,$$

где C_0, A и γ – положительные коэффициенты, определяемые опытным путем [4 – 7].

Тогда для (совсем) старого бетона ($\tau \ge 360 сут$)

$$C(t,\tau)=C_0\cdot\left[1-\exp(-\gamma(t-\tau))\right]. \quad (6)$$

Некоторые значения констант C_0, A и γ, входящих в функции $\varphi(\tau)$ и $f(t-\tau)$ по Н.Х. Арутюняну, полученные для разных бетонов при температуре t = 20°С и неизолированных на воздухе условиях хранения, представлены в табл. 2, фрагментарно заимствованной из монографии [7].

Таблица 2. Некоторые значения констант C_0, A и γ

Площадь поперечного квадратного сечения образца, см^2	γ, 1/сут	$C_0 \cdot 10^5$ см^2/кгс	$A \cdot 10^5$ (см^2/кгс)/сут
100	0,009	0,68	1,29
49	0,014	1,02	0,82

Из рассмотрения табл. 2 видно, что чем больше площадь поперечного сечения образца, тем меньше в нем проявляется ползучесть.

Весьма существенно, что модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ некоторых материалов зависит, вообще говоря, от времени t: $E = E(t)$ и $\mu = \mu(t)$.

Так, для стареющего бетона справедлива формула [6]

$$E(\tau) = E(\infty) \cdot \left[1 - 0{,}372\exp(-0{,}0259\tau)\right],\ \tau \geq 7сут,$$

где $E(\infty)$ – предельное значение модуля упругости (модуля упругомгновенного деформирования) $E(\tau)$, соответствующее старому бетону.

Практически $E(\infty) = E(\tau)$ при $\tau \geq 360сут$.

Например:

- для бетона класса В22,5 (марки М300)

$E(\infty)$ = 3,54 · 104 МПа; при $\tau = 7\ сут$ Е (7) = 2,44 · 104 МПа, при $\tau = 28\ сут$ Е (28) = 2,90 · 104 МПа (начальный модуль), при $\tau = 100\ сут$ Е(100) = 3,44 · 104 МПа, при $\tau = 200\ сут$ Е(200) = 3,53· 104 МПа, при $\tau = 360\ сут$ Е(360) = $E(\infty)$ = 3,54· 104 МПа;

- для бетона класса В30 (марки М400)

$E(\infty)$ = 4,02 · 104 МПа; при $\tau = 7\ сут$ Е (7) = 2,77 · 104 МПа, при $\tau = 28\ сут$ Е (28) = 3,30 · 104 МПа (начальный модуль), при $\tau = 100\ сут$ Е(100) = 3,91 · 104 МПа, при $\tau = 200\ сут$ Е(200) = 4,01· 104 МПа, при $\tau = 360\ сут$ Е(360) = $E(\infty)$ = 4,02· 104 МПа.

Из соотношений (5) для старого бетона ($\tau \geq 360сут$) получаем

$$K_1(t,\tau) = -E\frac{\partial C(t,\tau)}{\partial\tau},\ K_2(t,\tau) = -G\frac{\partial\omega(t,\tau)}{\partial\tau} = -2G\frac{\partial C(t,\tau)}{\partial\tau},$$

где $E = E(\infty)$; $G = G(\infty)$ – предельное значение модуля сдвига, соответствующее старому бетону.

В частности, на основании формулы (6) для старого бетона имеем

$$K_1(t,\tau) = \gamma E C_0 \exp(-\gamma(t-\tau)),\ K_2(t,\tau) = 2K_1(t,\tau)\cdot\frac{G}{E},$$

откуда получаем (как резольвенты интегральных уравнений (4))

$$R_1(t,\tau) = \gamma E C_0 \exp(-\gamma(1+EC_0)\cdot(t-\tau)),\ R_2(t,\tau) = 2R_1(t,\tau)\cdot\frac{G}{E}.$$

Весьма важен учет ползучести при анализе оболочек, выполненных из ортотропных материалов, которые широко применяются при строительстве как временных, так и капитальных сооружений.

К ортотропным материалам относятся железобетон (при различной жесткости армирования во взаимно ортогональных направлениях x и y), многие полимеры (пластмассы и т. п.), дерево и др.

Физические соотношения для оболочек, выполненных из ортотропных материалов в общем случае (при изменяющихся со временем t продольных модулях упругости $E_1 = E_1(t)$, $E_2 = E_2(t)$ и коэффициентах Пуассона $\mu_1 = \mu_1(t)$, $\mu_2 = \mu_2(t)$) при произвольных функциях влияния можно записать в виде

$$\varepsilon_x^z(t)=\frac{1}{E_1(t)}[\sigma_x(t)-\mu_1(t)\sigma_y(t)]+\int_{t_0}^{t}\frac{\sigma_x(\tau)-\mu_1(\tau)\sigma_y(\tau)}{E_1(\tau)}K_1(t,\tau)d\tau;$$

$$\varepsilon_y^z(t)=\frac{1}{E_2(t)}[\sigma_y(t)-\mu_2(t)\sigma_x(t)]+\int_{t_0}^{t}\frac{\sigma_y(\tau)-\mu_2(\tau)\sigma_x(\tau)}{E_2(\tau)}K_1(t,\tau)d\tau; \quad (7)$$

$$\gamma_{xy}^z(t)=\frac{1}{G_{12}(t)}\tau_{xy}(t)+\int_{t_0}^{t}\frac{\tau_{xy}(\tau)}{G_{12}(\tau)}K_2(t,\tau)d\tau;$$

$$\gamma_{xz}(t)=\frac{1}{G_{13}(t)}\tau_{xz}(t)+\int_{t_0}^{t}\frac{\tau_{xz}(\tau)}{G_{13}(\tau)}K_2(t,\tau)d\tau;$$

$$\gamma_{yz}(t)=\frac{1}{G_{23}(t)}\tau_{yz}(t)+\int_{t_0}^{t}\frac{\tau_{yz}(\tau)}{G_{23}(\tau)}K_2(t,\tau)d\tau.$$

Обратные к (7) соотношения имеют вид

$$\sigma_x=G_1(t)\left(\varepsilon_x^z(t)+\mu_2(t)\varepsilon_y^z(t)\right)-\int_{t_0}^{t}G_1(t)\left(\varepsilon_x^z(\tau)+\mu_2(\tau)\varepsilon_y^z(\tau)\right)R_1(t,\tau)d\tau;$$

$$\sigma_y=G_2(t)\left(\varepsilon_y^z(t)+\mu_1(t)\varepsilon_x^z(t)\right)-\int_{t_0}^{t}G_2(t)\left(\varepsilon_y^z(\tau)+\mu_1(\tau)\varepsilon_x^z(\tau)\right)R_1(t,\tau)d\tau;$$

$$\tau_{xy}=G_{12}(t)\gamma_{xy}^z(t)-\int_{t_0}^{t}G_{12}(\tau)\gamma_{xy}^z(\tau)R_2(t,\tau)d\tau; \quad (8)$$

$$\tau_{xz}=G_{13}(t)\gamma_{xz}(t)-\int_{t_0}^{t}G_{13}(\tau)\gamma_{xz}(\tau)R_2(t,\tau)d\tau;$$

$$\tau_{yz}=G_{23}(t)\gamma_{xz}(t)-\int_{t_0}^{t}G_{23}(\tau)\gamma_{yz}(\tau)R_2(t,\tau)d\tau,$$

где $R_1(t,\tau)$, $R_2(t,\tau)$ – функции влияния (ядро релаксации) материала соответственно при растяжении (сжатии) и сдвиге; $G_1(t)=\dfrac{E_1(t)}{1-\mu_1(t)\mu_2(t)}$, $G_1(t)=\dfrac{E_2(t)}{1-\mu_1(t)\mu_2(t)}$; $G_{12}(t)$, $G_{13}(t)$, $G_{23}(t)$ – переменные (зависящие от *t*) модули сдвига.

Отметим, что в каждом слагаемом соотношений (8) переменные деформации $\varepsilon_x^z(t)$, $\varepsilon_y^z(t)$, $\gamma_{xy}^z(t)$, $\gamma_{xz}(t)$ и $\gamma_{yz}(t)$ представляют собой полные деформации.

С целью упрощения вида физических соотношений для общего случая ортотропного материала оболочки условимся опускать временной аргумент *t* деформаций, модулей Юнга, коэффициентов Пуассона и т. д.

Придадим выражениям (8) следующий вид:

$$\sigma_x=\sigma_x^e-\sigma_x^c, \quad \sigma_y=\sigma_y^e-\sigma_y^c, \quad \tau_{xy}=\tau_{xy}^e-\tau_{xy}^c,$$

$$\tau_{xz}=\tau_{xz}^e-\tau_{xz}^c, \quad \tau_{yz}=\tau_{yz}^e-\tau_{yz}^c, \quad (9)$$

где упругомгновенные (в частности, упругие) составляющие (отмечены индексом «*e*») определяются с помощью формул:

$$\sigma_x^e=G_1(\varepsilon_x^z+\mu_2\varepsilon_y^z), \quad \sigma_y^e=G_2(\varepsilon_y^z+\mu_1\varepsilon_x^z);$$

$$\tau_{xy}^e=G_{12}\gamma_{xy}^z, \quad \tau_{xz}^e=G_{13}\gamma_{xz}, \quad \tau_{yz}^e=G_{23}\gamma_{yz}, \quad (10)$$

а составляющие, обусловленные ползучестью материала (отмечены индексом «*c*»), вычисляются с помощью соотношений

$$\sigma_x^c = \int_{t_0}^{t} G_1\left(\varepsilon_x^z + \mu_2\varepsilon_y^z\right)R_1(t,\tau)d\tau, \quad \sigma_y^c = \int_{t_0}^{t} G_2\left(\varepsilon_y^z + \mu_1\varepsilon_x^z\right)R_1(t,\tau)d\tau;$$

$$\tau_{xy}^c = \int_{t_0}^{t} G_{12}\gamma_{xy}^z R_2(t,\tau)d\tau, \quad \tau_{xz}^c = \int_{t_0}^{t} G_{13}\gamma_{xz} R_2(t,\tau)d\tau, \quad \tau_{yz}^c = \int_{t_0}^{t} G_{23}\gamma_{yz} R_2(t,\tau)d\tau. \quad (11)$$

В случае изотропного материала физические соотношения являются частным случаем соотношений (9)–(11) при $E_1 = E_2 = E$ и $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, а также $G_1 = G_2 = E/(1-\mu^2)$, $G_{12} = G_{13} = G_{23} = G = E/2(1+\mu)$.

Зачастую изотропным материалом можно считать старый бетон (железобетон), физические соотношения для которого имеют вид (2).

Интегрируя напряжения (9) по *z* в пределах от $-h/2$ до $h/2 + H$, с учетом (10) и (11) получим выражения для усилий, моментов и поперечных сил (приведенных к срединной поверхности и приходящихся на единицу длины сечения) в следующем виде:

$$N_x = N_x^e - N_x^c, \quad N_y = N_y^e - N_y^c, \quad N_{xy} = N_{xy}^e - N_{xy}^c,$$
$$M_x = M_x^e - M_x^c, \quad M_y = M_y^e - M_y^c, \quad M_{xy} = M_{xy}^e - M_{xy}^c \quad (12)$$
$$Q_x = Q_x^e - Q_x^c, \quad Q_y = Q_y^e - Q_y^c,$$

где упругомгновенные (в частности, упругие) составляющие (с индексом «*e*») вычисляются по формулам

$$N_x^e(t) = G_1\left[(h+\overline{F})(\varepsilon_x + \mu_2\varepsilon_y) + \overline{S}(\chi_1 + \mu_2\chi_2)\right];$$
$$N_y^e(t) = G_2\left[(h+\overline{F})(\varepsilon_y + \mu_1\varepsilon_x) + \overline{S}(\chi_2 + \mu_1\chi_1)\right];$$
$$N_{xy}^e(t) = G_{12}\left[(h+\overline{F})\gamma_{xy} + 2\overline{S}\chi_{12}\right]. \quad (13)$$
$$M_x^e(t) = G_1\left[\overline{S}(\varepsilon_x + \mu_2\varepsilon_y) + \left(\frac{h^3}{12} + \overline{J}\right)(\chi_1 + \mu_2\chi_2)\right];$$
$$M_y^e(t) = G_2\left[\overline{S}(\varepsilon_y + \mu_1\varepsilon_x) + \left(\frac{h^3}{12} + \overline{J}\right)(\chi_2 + \mu_1\chi_1)\right];$$
$$M_{xy}^e(t) = G_{12}\left[\overline{S}\gamma_{xy} + 2\left(\frac{h^3}{12} + \overline{J}\right)\chi_{12}\right];$$
$$Q_x^e(t) = kG_{13}(h+\overline{F})\left(\psi_x - \theta_1\right); \quad Q_y^e(t) = kG_{23}(h+\overline{F})\left(\psi_y - \theta_2\right),$$

а составляющие внутренних силовых факторов, обусловленные ползучестью материала (с индексом «*c*»), определяются с помощью выражений

$$N_x^c = \int_{t_0}^{t} N_x^e(\tau)R_1(t,\tau)d\tau; \quad N_y^c = \int_{t_0}^{t} N_y^e(\tau)R_1(t,\tau)d\tau;$$
$$N_{xy}^c = \int_{t_0}^{t} N_{xy}^e(\tau)R_2(t,\tau)d\tau; \quad M_x^c = \int_{t_0}^{t} M_x^e(\tau)R_1(t,\tau)d\tau; \quad (14)$$
$$M_y^c = \int_{t_0}^{t} M_y^e(\tau)R_1(t,\tau)d\tau; \quad M_{xy}^c = \int_{t_0}^{t} M_{xy}^e(\tau)R_2(t,\tau)d\tau;$$
$$Q_x^c(t) = \int_{t_0}^{t} Q_x^e(\tau)R_2(t,\tau)d\tau; \quad Q_y^c = \int_{t_0}^{t} Q_y^e(\tau)R_2(t,\tau)d\tau.$$

В соотношениях (13) и (14) $\overline{F}$, $\overline{S}$, $\overline{J}$ – площадь поперечного (или продольного) сечения ребра, приходящаяся на единицу длины сечения, статический момент и момент инерции данного сечения соответственно:

$$\overline{F} = \int_{h/2}^{h/2+H} dz, \quad \overline{S} = \int_{h/2}^{h/2+H} z\,dz, \quad \overline{J} = \int_{h/2}^{h/2+H} z^2 dz.$$

3. Функционал полной энергии деформации оболочки при учете ползучести материала

Известно, что функционал $Э$ полной энергии деформации оболочки для задач статики представляет собой разность потенциальной энергии Π и работы внешних сил A^E:

$$Э = \Pi - A^E,$$

где:

$$\Pi = \frac{1}{2}\iiint\limits_{\Omega} [\sigma_x\varepsilon_x^z + \sigma_y\varepsilon_y^z + \tau_{xy}\gamma_{xy}^z + \tau_{xz}\gamma_{xz} + \tau_{yz}\gamma_{yz}]d\Omega,$$

$$A^E = \iint\limits_{S} (P_xU + P_yV + qW)dS.$$

Здесь P_x, P_y и q – компоненты внешней нагрузки в направлении осей x, y и z; Ω – область в пространстве (x, y, z); S – область в плоскости (x, y); $d\Omega$ и dS – дифференциалы объема и отсчетной поверхности данной оболочки соответственно ($d\Omega = ABdxdydz$; $dS = ABdxdy$).

На основании соотношений (8) представим функционал $Э$ в виде [8 – 11]

$$Э = Э_e - Э_c,$$

где (в рассматриваемой системе координат):

$$Э_e = \frac{1}{2}\iiint\limits_{\Omega} [\sigma_x^e\varepsilon_x^z + \sigma_y^e\varepsilon_y^z + \tau_{xy}^e\gamma_{xy}^z + \tau_{xz}^e\gamma_{xz} + \tau_{xz}^e\gamma_{yz}]d\Omega - \iint\limits_{S} (P_xU + P_yV + qW)dS \quad (15)$$

соответствует линейно упругой (или упругомгновенной) постановке задачи, а функционал

$$Э_c = \frac{1}{2}\iiint\limits_{\Omega} [\sigma_x^c\varepsilon_x^z + \sigma_y^c\varepsilon_y^z + \tau_{xy}^c\gamma_{xy}^z + \tau_{xz}^c\gamma_{xz} + \tau_{xz}^c\gamma_{yz}]d\Omega \quad (16)$$

описывает ползучесть в материале оболочки.

Проинтегрируем функционалы (15) и (16) по переменной z ($-h/2 \le z \le h/2+H$). В результате получим:

$$Э_e = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b \{N_x^e\varepsilon_x + N_y^e\varepsilon_y + N_{xy}^e\gamma_{xy} + M_x^e\chi_1 + M_y^e\chi_2 + 2M_{xy}^e\chi_{12} + Q_x^e(\psi_x - \theta_1) +$$
$$+ Q_y^e(\psi_y - \theta_2) - 2(P_xU + P_yV + qW)\}ABdxdy.$$

$$Э_c = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b \{N_x^c\varepsilon_x + N_y^c\varepsilon_y + N_{xy}^c\gamma_{xy} + M_x^c\chi_1 + M_y^c\chi_2 + 2M_{xy}^c\chi_{12} + Q_x^c(\psi_x - \theta_1) +$$
$$+ Q_y^c(\psi_y - \theta_2)\}ABdxdy.$$

Функционалы $Э_e$ и $Э_c$, выраженные через деформации с учетом (13) и (14), примут вид

$$Э_e = \frac{G_1}{2}\int_0^a\int_0^b \Big\{(h + \overline{F})\Big[\varepsilon_x^2 + (\mu_2 + \overline{G}_2\mu_1)\varepsilon_x\varepsilon_y + \overline{G}_2\varepsilon_y^2 + \overline{G}_{12}\gamma_{xy}^2 + \overline{G}_{13}k(\psi_x - \theta_1)^2 +$$
$$+ \overline{G}_{23}k(\psi_y - \theta_2)^2\Big] + \overline{S}\Big[2\varepsilon_x\chi_1 + (\mu_2 + \overline{G}_2\mu_1)\varepsilon_x\chi_2 + (\mu_2 + \overline{G}_2\mu_1)\varepsilon_y\chi_1 + 2\overline{G}_2\varepsilon_y\chi_2 +$$
$$+ 2\overline{G}_{12}\gamma_{xy}2\chi_{12}\Big] + \left(\frac{h^3}{12} + J\right)\Big[\chi_1^2 + (\mu_2 + \overline{G}_2\mu_1)\chi_1\chi_2 + \overline{G}_2\chi_2^2 + \overline{G}_{12}2\chi_{12}2\chi_{12}\Big] -$$
$$- \frac{2}{G_1}(P_xU + P_yV + qW)\Big\}ABdxdy, \quad (13)$$

$$Э_c = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b\int_0^t G_1\Big\{\Big[(h + \overline{F})\Big(\varepsilon_x^2 + (\mu_2 + \overline{G}_2\mu_1)\varepsilon_x\varepsilon_y + \overline{G}_2\varepsilon_y^2\Big) + \overline{S} \times$$

$$\times\left(2\varepsilon_x\chi_1+(\mu_2+\overline{G}_2\mu_1)(\varepsilon_x\chi_2+\varepsilon_y\chi_1)+2\overline{G}_2\varepsilon_y\chi_2\right)+\left(\frac{h^3}{12}+\overline{J}\right)\left(\chi_1^2+(\mu_2+\overline{G}_2\mu_1)\chi_1\chi_2+\overline{G}_2\chi_2^2\right)\Bigg]\times$$

$$\times R_1(t,\tau)+\Big[(h+\overline{F})\left(\overline{G}_{12}\gamma_{xy}^2+\overline{G}_{13}k(\psi_x-\theta_1)^2+\overline{G}_{23}k(\psi_y-\theta_2)^2\right)+$$

$$+\overline{S}(2\overline{G}_{12}\gamma_{xy}2\chi_{12})+\left(\frac{h^3}{12}+\overline{J}\right)\overline{G}_{12}4\chi_{12}{}^2\Big]R_2(t,\tau)\Big\}ABdxdyd\tau\ . \quad (14)$$

В формулах (13) и (14)

$$\overline{G}_2=\frac{G_2}{G_1},\quad \overline{G}_{12}=\frac{G_{12}}{G_1},\quad \overline{G}_{13}=\frac{G_{13}}{G_1},\quad \overline{G}_{23}=\frac{G_{23}}{G_1}.$$

Граничные условия (определяемые способом закрепления контура оболочки) считаются заданными.

Таким образом, математическая модель деформирования ортотропных и изотропных ребристых оболочек при учете ползучести материала построена.

Алгоритм исследования предложенной математической модели и некоторые результаты анализа устойчивости упругих оболочек при длительных нагрузках приведены в работах автора [8 –11].

Литература

1. Карпов В.В., Игнатьев О.В., Сальников А.Ю. Нелинейные математические модели деформирования оболочек переменной толщины и алгоритмы их исследования. М.-СПб, 2002.
2. Жгутов В.М Нелинейные свободные колебания пологих оболочек ступенчато-переменной толщины: Дисс. … канд. техн. наук: 05.23.17: СПб, 2004.
3. Климанов В.И., Тимашев С.А. Нелинейные задачи подкрепленных оболочек. Свердловск, 1985.
4. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. М., 1982.
5. Беглов А.Д., Санжаровский Р.С. Теория расчета железобетонных конструкций на прочность и устойчивость. Современные нормы и Евростандарты. – М.-СПб., 2006.
6. Прокопович И.Е. Влияние длительных процессов на напряженное и деформированное состояние сооружений. М., 1963.
7. Прокопович И.Е., Зедгенидзе В.А. Прикладная теория ползучести. М., 1980.
8. Жгутов В.М. Исследование прочности и устойчивости ребристых оболочек с помощью вычислительного эксперимента // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: Сборник докладов VII Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте 23-24 апреля 2008 года. СПб., 2008. С. 110-131.
9. Жгутов В.М. Математические модели и алгоритмы исследования устойчивости пологих ребристых оболочек при учете различных свойств материала // Изв. Орловского гос. техн. ун-та. Сер. «Строительство, транспорт». – 2007.– № 4. Орел, 2007. С.20–23.
10. Жгутов В.М. Математическая модель и алгоритм исследования прочности и устойчивости ребристых оболочек с учетом различных свойств материала // «Инженерные системы – 2008»: Всероссийская научно-практическая конференция: Труды конференции. Москва, 7-11 апреля 2008 года, РУДН. М., 2008. С. 341-346.
11. Жгутов В.М. Анализ различных подходов к исследованию ползучести в материале ребристых пологих оболочек // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2010. – №1 (в печати). С. 4-12.

**Владимир Михайлович Жгутов, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812)378-20-83; эл. почта: abc_kitezh@mail.ru

Прочность и устойчивость упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек. I

К.т.н. В.М. Жгутов*,
ООО «Архитектурно-строительная компания «Китеж»

Известно, что под воздействием нагрузок тонкостенные оболочечные конструкции могут допускать прогибы, соизмеримые с их толщиной. С целью повышения их жесткости они зачастую подкрепляются ребрами.

Весьма важно при исследовании устойчивости таких оболочек проводить проверку их прочности, поскольку вблизи критических нагрузок уровень напряжений для большинства материалов превышает допустимый.

Получаемые расчетные уравнения равновесия ортотропных и изотропных оболочек представляют собой сложные и труднообозримые системы дифференциальных уравнений относительно искомых функций перемещений и углов поворота отрезка нормали в соответствующих плоскостях.

По этой причине исследование прочности и устойчивости указанных оболочек возможно только с помощью вычислительного эксперимента.

Важной задачей при этом является разработка более совершенной математической модели деформирования оболочек и алгоритма ее исследования, удобного для программирования.

Рассматриваем оболочки общего вида, подразумевая достаточно широкий класс оболочек наиболее распространенных частных видов: пологих на прямоугольном плане и вращения (в частности, цилиндрических, конических, сферических, торообразных), а также других оболочек.

Срединную поверхность оболочки (точнее, ее обшивки) толщиной h принимаем за координатную поверхность $z = 0$.

Полагаем, что оси x и y криволинейной ортогональной системы координат ($0 \leq x \leq a$; $0 \leq y \leq b$) направлены по линиям кривизны срединной поверхности (параллелям и меридианам в случае оболочки вращения), а ось z – по нормали к поверхности $z = 0$ в сторону ее вогнутости.

Со стороны вогнутости оболочка подкреплена ребрами жесткости, расставленными вдоль координатных линий.

Ребра задаем дискретно с помощью функции $H=H(x,y)$, характеризующей распределение ребер по оболочке и их высоту [1, 2].

Таким образом, толщина всей конструкции равна $h+H$ и $-h/2 \leq z \leq h/2+H$.

Считаем, что оболочка находится под действием механической нагрузки при определенном закреплении ее контура.

Будем учитывать геометрическую нелинейность, дискретное расположение ребер, их ширину, сдвиговую и крутильную жесткости ребер, поперечные сдвиги.

Как известно, математическая модель деформирования оболочки включает в себя:

- геометрические соотношения (связь деформаций и перемещений);
- физические соотношения (связь напряжений и деформаций);
- функционал полной энергии деформации оболочки, из условия минимума которой могут быть получены уравнения устойчивого равновесия или движения данной оболочки.

1. Геометрические соотношения для ребристых оболочек при больших перемещениях

Геометрические соотношения в срединной поверхности z=0 получаются с помощи операции ковариантного дифференцирования векторного поля перемещений и с учетом геометрической нелинейности имеют вид

$$\varepsilon_x = \frac{1}{A}\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{1}{AB}\frac{\partial A}{\partial y}V - K_x W + \frac{1}{2}\theta_1^2;\ \varepsilon_y = \frac{1}{B}\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{AB}\frac{\partial B}{\partial x}U - K_y W + \frac{1}{2}\theta_2^2;$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{A}\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{B}\frac{\partial U}{\partial y} - \frac{1}{AB}\left(\frac{\partial A}{\partial y}U + \frac{\partial B}{\partial x}V\right) + \theta_1\,\theta_2,$$

где ε_x, ε_y и γ_{xy} – деформации удлинения вдоль осей *x*, *y* и, соответственно, сдвига в касательной плоскости (*dx*,*dy*); *U*, *V* и *W* – компоненты вектора перемещений (перемещения) точек вдоль осей *x*, *y* и *z* соответственно; *A* и *B* – метрические коэффициенты Ламе, зависящие от вида оболочки (например, *A*=*B*=1 для пологой оболочки и *A*=*const*, *B*=*B(x)* в случае оболочки вращения); $K_x = 1/R_1$, $K_y = 1/R_2$ – главные кривизны (R_1, R_2 – главные радиусы кривизны) оболочки вдоль осей *x* и *y* соответственно;

$$\theta_1 = -\left(\frac{1}{A}\frac{\partial W}{\partial x} + K_x U\right);\ \theta_2 = -\left(\frac{1}{B}\frac{\partial W}{\partial y} + K_y V\right).$$

В указанных соотношениях квадратичные члены (от угловых перемещений) характеризуют геометрическую нелинейность, которую следует учитывать в случаях, когда квадратом длины вектора перемещений нельзя пренебречь в сравнении с его длиной [в частности, когда поперечные перемещения *W* (прогибы) соизмеримы с толщиной оболочки *h*].

Деформации поперечных сдвигов определяем по формулам

$$\gamma_{xz} = k\,f(z)(\psi_x - \theta_1);\ \gamma_{yz} = k\,f(z)(\psi_y - \theta_2).$$

Здесь ψ_x и ψ_y – углы поворота отрезка нормали в плоскостях (*dx*,*dz*) и (*dy*,*dz*) соответственно; *f*(*z*) – функция, характеризующая распределение напряжений τ_{xz} и τ_{yz} вдоль оси *z*; *k* – константа.

Будем полагать, что материалы обшивки и ребер имеют одинаковые (или близкие) сдвиговые жесткости. Тогда функция что *f*(*z*) может быть принята в виде [1 , 2]

$$f(z) = -\frac{6}{(h+H)^2}\left(z + \frac{h}{2}\right)\left(z - \frac{h}{2} - H\right).$$

Эта функция при *z* = – *h*/2 и *z* = *h*/2 + *H* обращается в нуль и удовлетворяет условиям

$$\frac{1}{h+H}\int_{-h/2}^{h/2+H} f(z)dz = 1;\ \frac{1}{h+H}\int_{-h/2}^{h/2+H} f^2(z)dz = \frac{1}{k} \qquad (k = 5/6).$$

Перемещения в слое $z \neq 0$ определяем по формулам

$$U^z = U + z\psi_x,\ V^z = V + z\psi_y,\ W^z = W,$$

откуда для деформаций в слое $z \neq 0$ получаем соотношения в виде

$$\varepsilon_x^z = \varepsilon_x + z\chi_1,\quad \varepsilon_y^z = \varepsilon_y + z\chi_2,\quad \gamma_{xy}^z = \gamma_{xy} + 2z\chi_{12},$$

где χ_1, χ_2 и χ_{12} – функции изменения кривизны и кручения, определяемые, как легко видеть, по формулам:

$$\chi_1 = \frac{1}{A}\frac{\partial\psi_x}{\partial x} + \frac{1}{AB}\frac{\partial A}{\partial y}\psi_y;\ \chi_2 = \frac{1}{B}\frac{\partial\psi_y}{\partial y} + \frac{1}{AB}\frac{\partial B}{\partial x}\psi_x;$$

$$2\chi_{12} = \frac{1}{A}\frac{\partial\psi_y}{\partial x} + \frac{1}{B}\frac{\partial\psi_x}{\partial y} - \frac{1}{AB}\left(\frac{\partial A}{\partial y}\psi_x + \frac{\partial B}{\partial x}\psi_y\right).$$

2. Физические соотношения для упругих ортотропных и изотропных материалов оболочек

Физические соотношения в произвольной точке оболочки, выполненной из линейно упругого ортотропного материала, в соответствии с обобщенным законом Гука имеют вид

$$\sigma_x = G_1[\varepsilon_x + \mu_2\varepsilon_y + z(\chi_1 + \mu_2\chi_2)],\ \sigma_y = G_2[\varepsilon_y + \mu_1\varepsilon_x + z(\chi_2 + \mu_1\chi_1)];\ \tau_{xy} = G_{12}[\gamma_{xy} + 2z\chi_{12}] \quad (1)$$

$$\tau_{xz} = G_{13}\gamma_{xz} = G_{13}k\,f(z)(\psi_x - \theta_1);\ \tau_{yz} = G_{23}\gamma_{yz} = G_{23}k\,f(z)(\psi_y - \theta_2),$$

где E_1, E_2 и μ_1, μ_2 – продольные модули Юнга и коэффициенты Пуассона данного материала, причем $E_1\mu_2 = E_2\mu_1$; G_{12}, G_{13} и G_{23} – модули сдвига соответственно в плоскостях симметрии (*dx*, *dy*), (*dx*, *dz*) и (*dy*, *dz*) материала оболочки.

В случае изотропного линейно упругого материала физические соотношения являются частным случаем соотношений (1) при $E_1=E_2=E$ и $\mu_1=\mu_2=\mu$, а также $G_{12}=G_{13}=G_{23}=G=E/2(1+\mu)$.

Интегрируя напряжения из (1) по z в пределах от $-h/2$ до $h/2+H$, получаем усилия, моменты и поперечные силы, приведенные к отсчетной поверхности и приходящиеся на единицу длины сечения:

$$N_x = G_1[(h+\overline{F})(\varepsilon_x+\mu_2\varepsilon_y)+\overline{S}(\chi_1+\mu_2\chi_2)],\quad N_y = G_2[(h+\overline{F})(\varepsilon_y+\mu_1\varepsilon_x)+\overline{S}(\chi_2+\mu_1\chi_1)],$$

$$N_{xy} = G_{12}[(h+\overline{F})\gamma_{xy}+2\overline{S}\chi_{12}];$$

$$M_x = G_1\left[\overline{S}(\varepsilon_x+\mu_2\varepsilon_y)+\left(\frac{h^3}{12}+\overline{J}\right)(\chi_1+\mu_2\chi_2)\right],\quad M_y = G_2\left[\overline{S}(\varepsilon_y+\mu_1\varepsilon_x)+\left(\frac{h^3}{12}+\overline{J}\right)(\chi_2+\mu_1\chi_1)\right], \quad (2)$$

$$M_{xy} = G_{12}\left[\overline{S}\gamma_{xy}+2\left(\frac{h^3}{12}+\overline{J}\right)\chi_{12}\right];$$

$$Q_x = kG_{13}(h+\overline{F})(\psi_x-\theta_1),\quad Q_y = kG_{23}(h+\overline{F})(\psi_y-\theta_2).$$

Здесь $\overline{F}$, $\overline{S}$, $\overline{J}$ – площадь поперечного (или продольного) сечения ребра, приходящаяся на единицу длины сечения, статический момент и момент инерции данного сечения соответственно:

$$\overline{F} = \int_{h/2}^{h/2+H} dz,\quad \overline{S} = \int_{h/2}^{h/2+H} z\,dz,\quad \overline{J} = \int_{h/2}^{h/2+H} z^2 dz;$$

$$G_1 = \frac{E_1}{1-\mu_1\mu_2},\quad G_2 = \frac{E_2}{1-\mu_1\mu_2}.$$

3. Функционалы полной энергии деформации упругих ортотропных и изотропных оболочек

Известно, что функционал $Э$ полной энергии деформации оболочки для задач статики представляет собой разность потенциальной энергии Π и работы внешних сил A^E:

$$Э = \Pi - A^E, \quad (3)$$

где (в рассматриваемой системе координат)

$$\Pi = \frac{1}{2}\iiint_{\Omega} [\sigma_x\varepsilon_x^z+\sigma_y\varepsilon_y^z+\tau_{xy}\gamma_{xy}^z+\tau_{xz}\gamma_{xz}+\tau_{yz}\gamma_{yz}]d\Omega$$

$$A^E = \iint_S (P_xU+P_yV+qW)dS.$$

Здесь P_x, P_y и q – компоненты внешней нагрузки в направлении осей x, y и z; Ω – область в пространстве (x, y, z); S – область в плоскости (x, y); $d\Omega$ и dS – дифференциалы объема и срединной поверхности данной оболочки соответственно ($d\Omega = ABdxdydz$; $dS = ABdxdy$).

Проинтегрируем функционал (3) по переменной z ($-h/2 \le z \le h/2+H$). В результате получим

$$Э = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b \{N_x\varepsilon_x+N_y\varepsilon_y+N_{xy}\gamma_{xy}+M_x\chi_1+M_y\chi_2+2M_{xy}\chi_{12}+Q_x(\psi_x-\theta_1)+$$
$$+Q_y(\psi_y-\theta_2)-2(P_xU+P_yV+qW)\}ABdxdy.$$

Функционал $Э$, выраженный через деформации с учетом (2), примет вид

$$Э = \frac{G_1}{2}\int_0^a\int_0^b \{(h+\overline{F})[\varepsilon_x^2+(\mu_2+\overline{G}_2\mu_1)\varepsilon_x\varepsilon_y+\overline{G}_2\varepsilon_y^2+\overline{G}_{12}\gamma_{xy}^2+\overline{G}_{13}k(\psi_x-\theta_1)^2+$$
$$+\overline{G}_{23}k(\psi_y-\theta_2)^2]+\overline{S}[2\varepsilon_x\chi_1+(\mu_2+\overline{G}_2\mu_1)\varepsilon_x\chi_2+(\mu_2+\overline{G}_2\mu_1)\varepsilon_y\chi_1+2\overline{G}_2\varepsilon_y\chi_2+$$
$$+2\overline{G}_{12}\gamma_{xy}2\chi_{12}]+\left(\frac{h^3}{12}+J\right)[\chi_1^2+(\mu_2+\overline{G}_2\mu_1)\chi_1\chi_2+\overline{G}_2\chi_2^2+\overline{G}_{12}2\chi_{12}2\chi_{12}]-$$

$$-\frac{2}{G_1}(P_xU+P_yV+qW)\Big\}ABdxdy\,, \quad (4)$$

где $\overline{G}_2=\frac{G_2}{G_1}$, $\overline{G}_{12}=\frac{G_{12}}{G_1}$, $\overline{G}_{13}=\frac{G_{13}}{G_1}$, $\overline{G}_{23}=\frac{G_{23}}{G_1}$.

В случае изотропного линейно упругого материала функционал (3) является частным случаем функционала (4) при $E_1=E_2=E$ и $\mu_1=\mu_2=\mu$, а также $G_{12}=G_{13}=G_{23}=G=E/2(1+\mu)$].

Граничные условия (определяемые способом закрепления контура оболочки) считаются заданными.

Таким образом, математическая модель деформирования упругих ортотропных и изотропных ребристых оболочек построена.

Алгоритм исследования предложенной математической модели и некоторые результаты анализа устойчивости упругих изотропных оболочек приведены ниже.

4. Алгоритм исследования предложенной математической модели деформирования оболочек

Для отыскания минимума энергии (4) применяем метод Ритца при разложении искомых функций $U(x,y)$, $V(x,y)$, $W(x,y)$, $\psi_x(x,y)$, $\psi_y(x,y)$ в виде

$$U=\sum_{I=1}^{N}U(I)X1(I)Y1(I);\; V=\sum_{I=1}^{N}V(I)X2(I)Y2(I);\; W=\sum_{I=1}^{N}U(I)X1(I)Y1(I);$$

$$\Psi_x=\sum_{I=1}^{N}PS(I)X4(I)Y4(I);\; \Psi_y=\sum_{I=1}^{N}PN(I)X5(I)Y5(I) \quad (5)$$

где $U(I),\ V(I),\ W(I), PS(I),\ PN(I)$ – неизвестные параметры, подлежащие определению; $X1(I)Y1(I),\ldots,X5(I)Y5(I)$ – известные аппроксимирующие функции переменных x и y, удовлетворяющие заданным краевым условиям.

В результате применения метода Ритца к функционалу (4) при разложении (5) получим систему нелинейных алгебраических уравнений, которую кратко запишем в виде [3 – 7]

$$F_л(X)-f\cdot q=-F_н(X)\,, \quad (6)$$

где $X=[U(I),\mathrm{V(I)},W(\mathrm{I}),PS(\mathrm{I}),PN(\mathrm{I})]^T$ – вектор неизвестных параметров; $f\cdot q$ - нагрузочный член (f – коэффициент); $F_л(X)$, $F_н(X)$ – линейная и нелинейная (геометрически) части системы.

Для решения уравнений (6) применяем метод итераций [3 – 7].

Последовательно увеличивая нагрузку q от 0 до некоторого критического значения $q_{кр}$ с малым шагом (например, $\Delta q = 10^{-3}$ МПа), методом итераций находим решения системы (6) при q_1, q_2, …, $q_к$.

$$F_л(X_i)-f\cdot q=-F_н(X_{i-1})\,. \quad (7)$$

Очевидно, что при заданном параметре нагрузки q можно определить значения функций перемещений $U(x,y)$, $V(x,y)$ и $W(x,y)$ и углов поворота отрезка нормали $\psi_x(x,y)$, $\psi_y(x,y)$ в любой точке оболочки, а с их помощью – напряженно-деформированное состояние (НДС) оболочки в данной точке.

При исследовании *устойчивости* оболочек строим кривую «нагрузка q – прогиб W» в какой-либо характерной точке оболочки (например, в центре оболочки). Нагрузку, соответствующую максимальному значению q на кривой «q – W» (или нагрузку, начиная с которой прогибы W начинают в некотором смысле быстро возрастать), принимаем за критическую нагрузку $q_{кр}$.

При исследовании устойчивости оболочек весьма важно проводить также и контроль *прочности* оболочек, поскольку вблизи критических нагрузок уровень напряжений для многих материалов может превышать допустимый.

Проверку прочности (в той или иной точке оболочки) осуществляем в ходе решения системы уравнений на каждом шаге добавления нагрузки (после определения НДС оболочки при заданном параметре нагрузки). Для пластичных материалов анализируем предельное упругое состояние с помощью энергетического критерия прочности, который приводит к критерию Мизеса – Хубера – Генки, согласно которому

$$\sigma_i \le \frac{\sigma_т}{k}, \quad (8)$$

где $\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$ – интенсивность напряжений (вычисления производим при $z = -h/2$); $\sigma_т$ – предел текучести материала; k – коэффициент запаса прочности.

Для хрупких материалов (бетона) применяем критерий Кулона – Мора, по которому для соблюдения прочности должно выполняться неравенство

$$\sigma_1 - \frac{R_р}{R_с}\sigma_3 \le \frac{R_р}{k},$$

где $R_р$ и $R_с$ – призменные прочности бетона при растяжении ($R_р$ = 2 МПа) и сжатии ($R_с$ = 30 МПа); σ_1 и σ_3 – главные напряжения, которые находятся из кубического уравнения

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y - \tau_{xy}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{yz}^2)\sigma - (2\tau_{yz}\tau_{xz}\tau_{xy} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2) = 0,$$

причем $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (вычисления осуществляем в слое $z = -h/2$).

5. Проанализированные варианты пологих оболочек на прямоугольном плане

Для представления и анализа решения использованы безразмерные параметры, описанные в [1, 2], в частности:

- безразмерные координаты $\xi = x/a,\ \eta = y/b,$ где a и b – размеры оболочки в плане;
- безразмерные кривизны $K_\xi = a^2K_x/h$, $K_\eta = b^2K_y/h$;
- безразмерные перемещения $\overline{U} = aU/h^2$, $\overline{V} = bV/h^2$, $\overline{W} = W/h$;
- безразмерная нагрузка

$$\overline{P} = a^4q/Eh^4; \quad (9)$$

- безразмерная интенсивность напряжений $\overline{\sigma}_i = a^2\sigma_i/Eh^2$.

Переход к безразмерным параметрам позволяет одной серией расчетов получать решения для подобных оболочек, выполненных из различных материалов (при одинаковом значении коэффициента Пуассона μ).

Вычислительный эксперимент выполнен для вариантов оболочек, представленных в табл. 1.

Таблица 1. Параметры проанализированных оболочек

Вариант оболочки	Параметры оболочки			Возможные реальные размеры, м		
	Размеры в плане $a = b$	Главные радиусы кривизны $R_1 = R_2$	Безразмерные кривизны $K_\xi = K_\eta$	Размеры в плане $a = b$	Главные радиусы кривизны $R_1 = R_2$	Толщина h
I	60*h*	225*h*	16	18	67,5	0,3
II	100*h*	251*h*	40	18	45,3	0,18
III	200*h*	503*h*	79,5	18	45,3	0,09
IV	600*h*	1510*h*	238	18	45,3	0,03

Для каждого варианта были рассмотрены:

- гладкие оболочки (число ребер подкрепления $N^P = 0$);
- ребристые оболочки при $N^P = 6$ и $N^P = 18$.

Считалось, что ребра расположены со стороны вогнутости оболочки равномерно и перекрестно, вдоль координатных линий *x* и *y*, соответственно по 3 ребра либо по 9 ребер в каждом из указанных направлений.

Высота ребер принималась 3*h*; ширина ребер полагалась равной 2*h*, 3,3*h*, 6,6*h* и 20*h* соответственно для вариантов оболочек I, II, III и IV.

Кроме того, при проведении расчетов предполагалось, что:

- поперечная нагрузка q равномерно распределена (q = const);
- контур оболочки закреплен шарнирно-неподвижным способом;
- коэффициент Пуассона μ = 0,3 (соответствует металлам);
- число членов разложения в методе Ритца N = 9.

5.1. Безразмерные критические нагрузки для рассмотренных вариантов оболочек

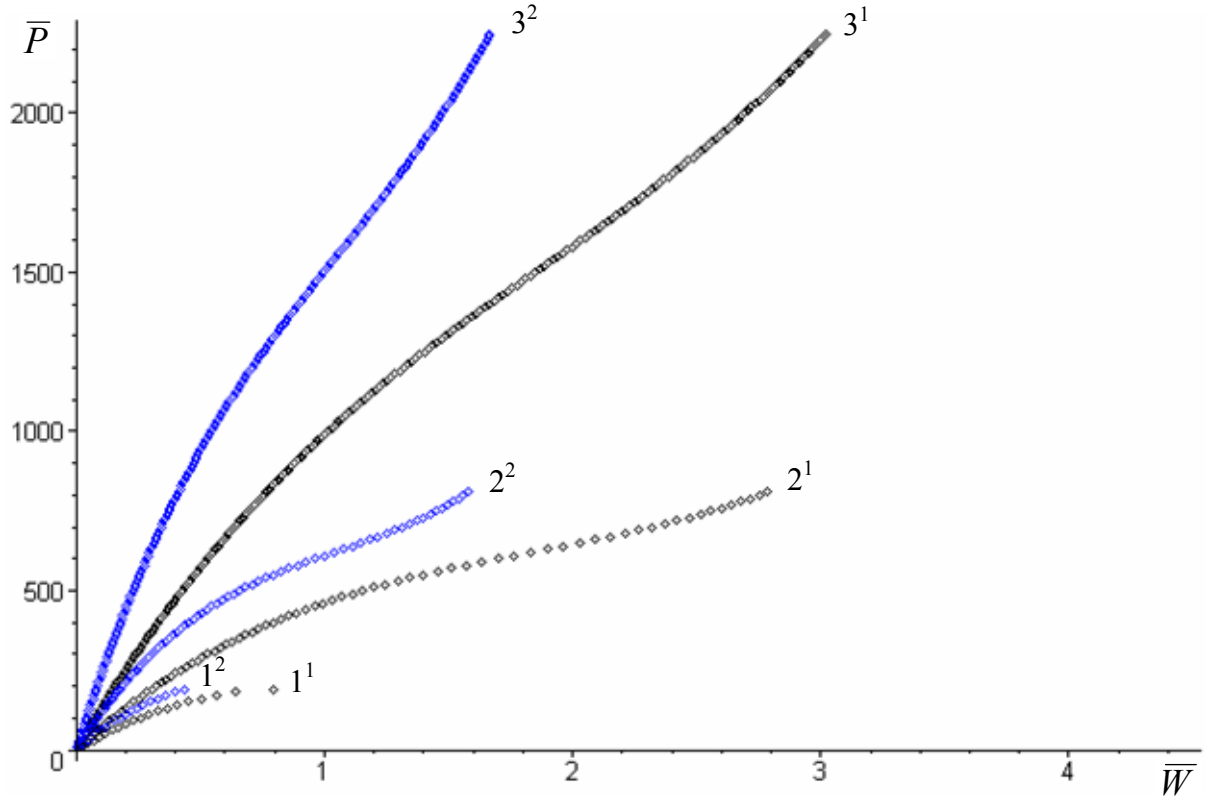


Рисунок 1. Зависимости « $\overline{P}$ – $\overline{W}$ » для оболочек варианта I

На рис. 1 для оболочек варианта I представлены различные графики «безразмерная нагрузка $\overline{P}$ – безразмерный прогиб $\overline{W}$ ».

Кривые с номером 1 получены для гладкой оболочки. Кривые с номерами 2 и 3 – для ребристых оболочек с шестью и, соответственно, восемнадцатью ребрами подкрепления.

Индексами 1 и 2 помечены номера кривых, отвечающих прогибу соответственно в центре $\overline{W}$ (0,5; 0,5) и четверти оболочки $\overline{W}$ (0,25; 0,25).

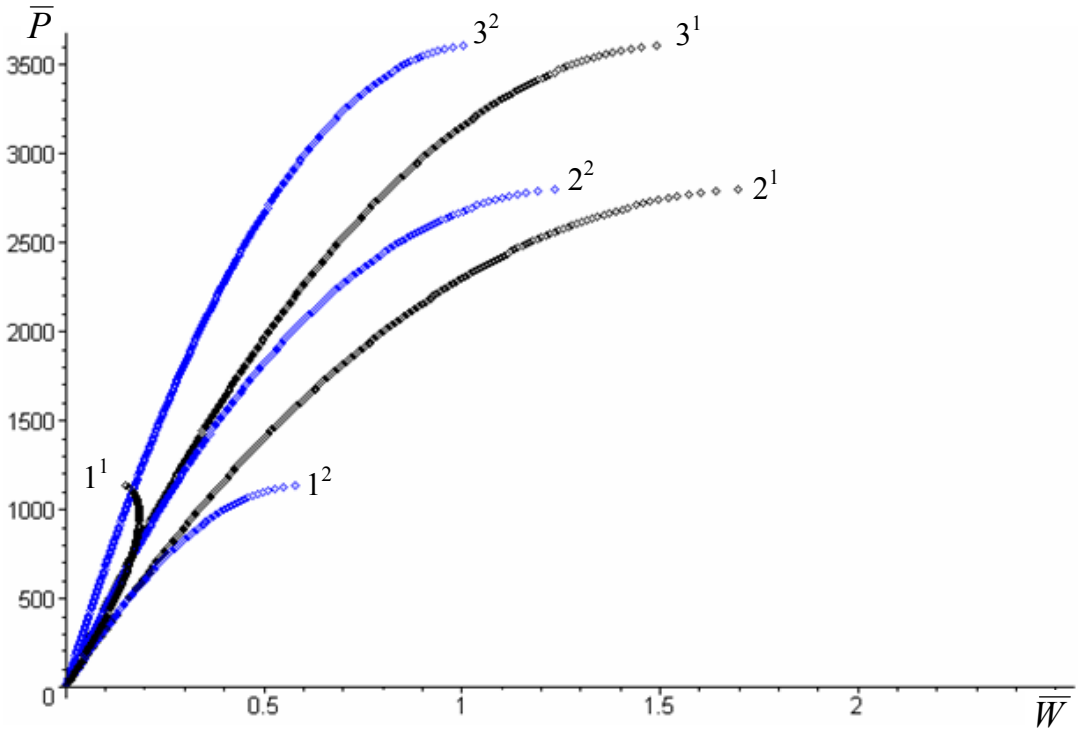
Как видно из рис.1, оболочка, подкрепленная ребрами, устойчивости не теряет.

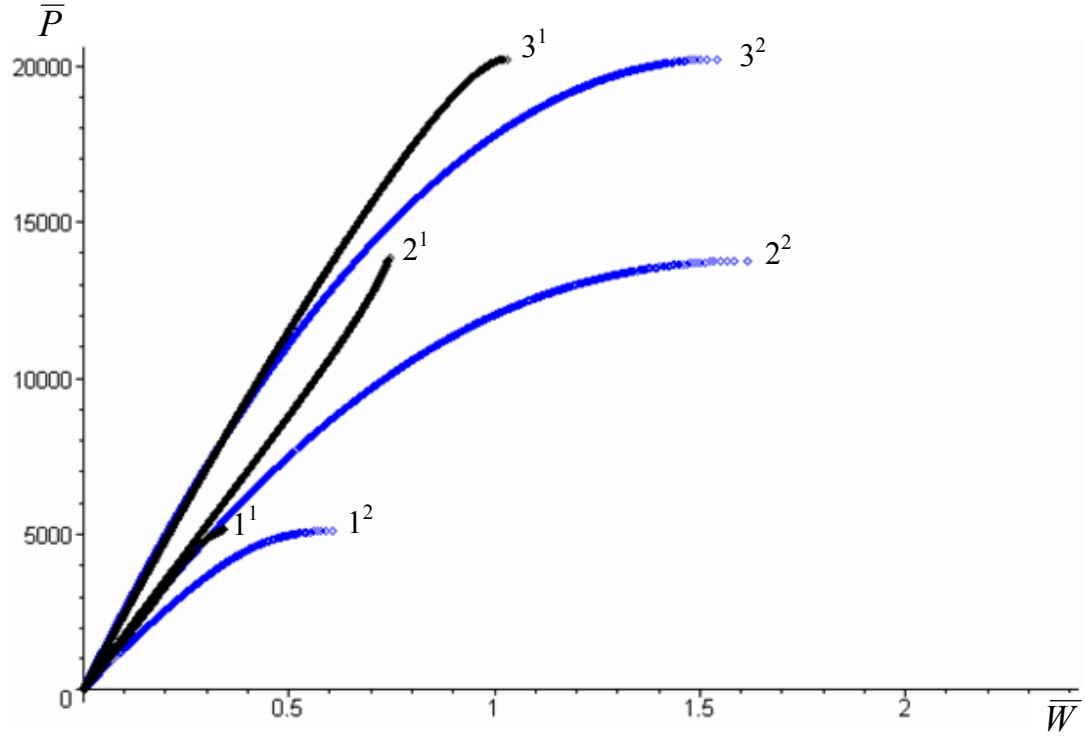
Для вариантов оболочек II, III и IV построены аналогичные графики « $\overline{P}$ – $\overline{W}$ », представленные соответственно на рис. 2, 3 и 4, где номера и индексы кривых имеют тот же смысл, что и на рис. 1.

В табл. 2 приведены для вариантов I – IV гладких и ребристых оболочек безразмерные критические нагрузки $\overline{P}_{кр}$, найденные при решении линейно упругой задачи.

Таблица 2. Расчетные значения безразмерной критической нагрузи $\overline{P}_{кр}$

Вариант оболочки	**Значения безразмерной критической нагрузки $\overline{P}_{кр}$ при числе ребер**		
	0	**6 (3 + 3)**	**18 (9 + 9)**
I	190	–	–
II	1140	2800	3610
III	5130	13770	20220
IV	71300	141480	212420





Рисунки 2-3. Зависимости « $\overline{P}$ – $\overline{W}$ » для оболочек варианта II и III

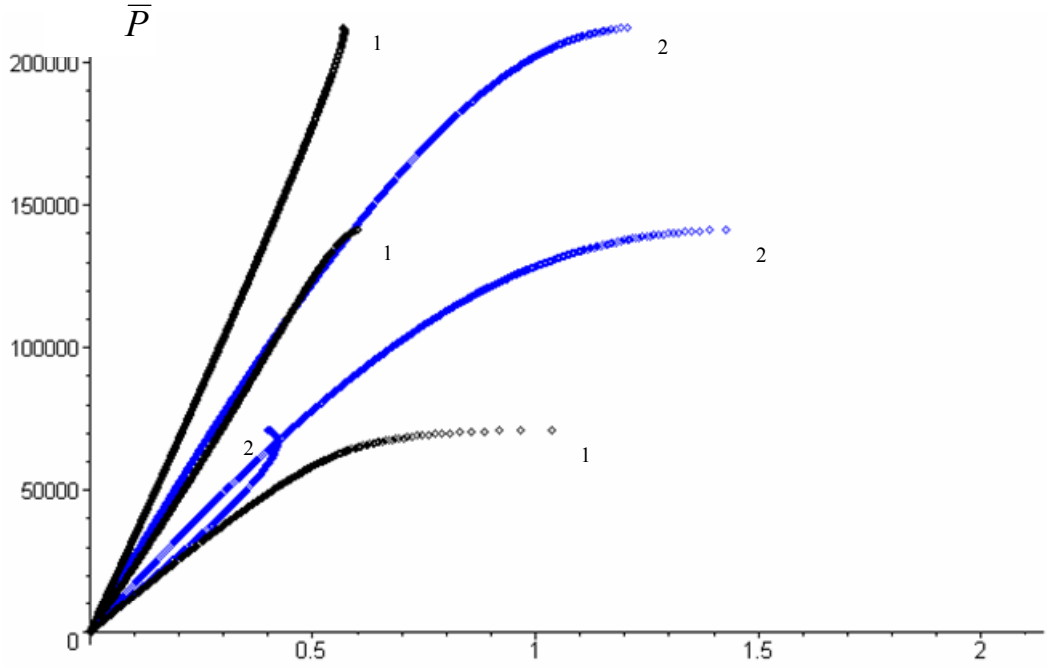


Рисунок 4. Зависимости « $\overline{P}$ – $\overline{W}$ » для оболочки варианта IV

Решение нелинейных уравнений равновесия осуществляется с использованием метода итераций. При этом находится первая из критических нагрузок (нагрузка, отвечающая смене равновесных состояний, начиная с которой происходит характерное «прощелкивание» или «выпучивание» оболочки).

Для ответа на вопрос о соответствии найденной нагрузки общей или местной потере устойчивости, необходимы дополнительные исследования.

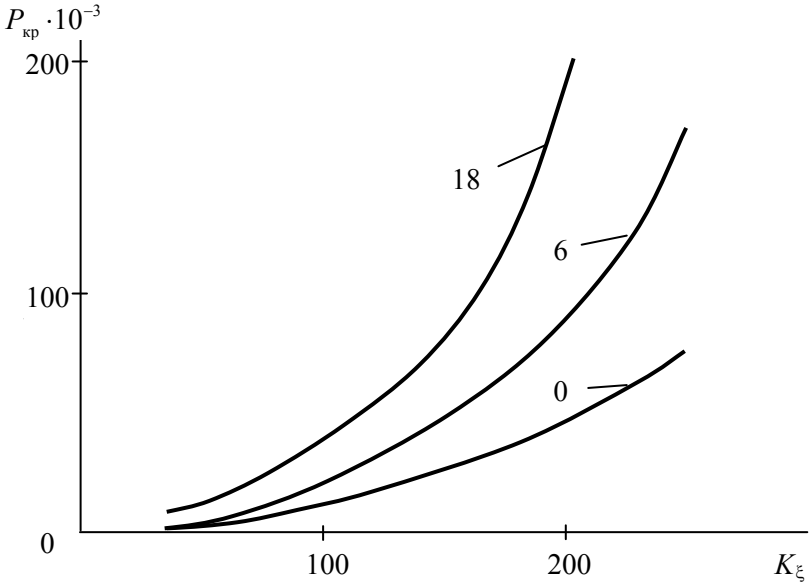


Рисунок 5. Графики « $\overline{P}_{кр}$ – K_ξ» в зависимости от $N_р$

На рис. 5 представлены графики «безразмерная критическая нагрузка $\overline{P}_{кр}$ – безразмерная кривизна K_ξ» ($K_\xi = K_\eta$). Номера кривых здесь означают число ребер $N_р$, подкрепляющих оболочку.

В выражение для безразмерной кривизны $K_\xi = a^2/hR_1$ входят реальные размерные параметры, характеризующие геометрию оболочки. Заметим, что для всех вариантов рассматриваемых оболочек имеет место совпадение реальных линейных размеров ($a = b = 18$ м), а также и главных радиусов кривизны ($R_1 = R_2 = 45{,}3$ м) в случае оболочек вариантов II, III и IV. Поэтому, в данном случае изображенные на рис. 5 кривые можно трактовать и как зависимости $\overline{P}_{кр}$ от толщины оболочки h.

5.2. Размерные критические нагрузки, соответствующие различным материалам, для рассмотренных вариантов оболочек

Результаты решения задач в безразмерных параметрах целесообразно использовать для нахождения размерных критических нагрузок $q_{кр}$, отвечающих различным материалам и реальным размерам оболочки.

Для перехода к размерным критическим нагрузкам используем зависимость (9), откуда

$$q_{кр} = \frac{Eh^4}{a^4}\overline{P}_{кр}, \quad (10)$$

Будем рассматривать следующие виды пластичных материалов (приведя принятые в расчетах значения их модуля упругости):

1) сталь 40 ХНВ закаленная ($E = 2{,}1 \cdot 10^5$ МПа);
2) технический титан ($E = 1{,}1 \cdot 10^5$ МПа);
3) дюраль ($E = 0{,}75 \cdot 10^5$ МПа);

В табл. 3 представлены значения размерных критических нагрузок $q_{кр}$, МПа для различных вариантов гладких и ребристых оболочек, выполненных из указанных металлов (сплавов).

Данные табл. 3 целесообразно применять при проектировании покрытий большепролетных сооружений.

Таблица 3. Значения размерных критических нагрузок $q_{кр}$

Материал оболочки	**Число ребер**	$q_{кр}$**, МПа, для вариантов оболочек**			
		I	**II**	**III**	**IV**
Сталь 40 ХНВ закаленная	0	3,08	2,39	0,67	0,115
	6 (3 + 3)	–	5,88	1,8	0,23
	18 (9 + 9)	–	7,58	2,65	0,35
Технический титан	0	1,61	1,27	0,35	0,06
	6 (3 + 3)	–	3,08	0,95	0,12
	18 (9 + 9)	–	3,97	1,39	0,18
Дюраль	0	1,1	0,85	0,24	0,04
	6 (3 + 3)	–	2,1	0,64	0,08
	18 (9 + 9)	–	2,7	0,95	0,12

Так, например, рационально выбирая материал оболочки, ее толщину и число подкрепляющих ребер можно заведомо надежно обеспечить устойчивость оболочки при расчетной нагрузке.

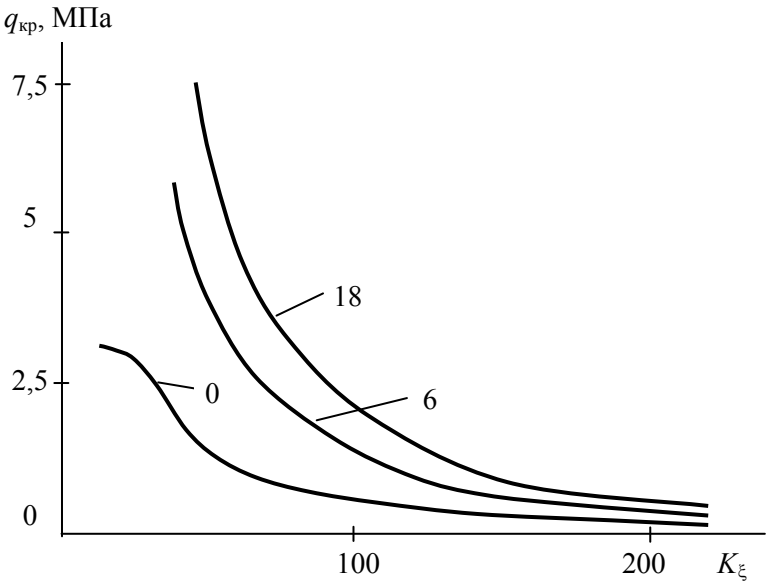


Рисунок 6. Графики «$q_{кр}$ – K_ξ» в зависимости от $N_р$ для стальной оболочки

На рис. 6 для наглядности представлены графики «$q_{кр}$ – K_ξ» для оболочки, изготовленной из стали 40 ХНВ закаленной. Как и выше, номер кривой здесь означает число ребер, подкрепляющих оболочку.

Допустим, что стальная оболочка имеет реальные размеры $a = b = 18$ м, $R_1 = R_2 = 45{,}3$ м и должна выдерживать нагрузку не менее 0,5 МПа. Тогда в случае ребристой оболочки с восемнадцатью ребрами подкрепления значение безразмерной кривизны K_ξ должно быть более 200, что соответствует толщине обшивки $h \le 0{,}03$ м. При этом объем материала оболочки $V_{об} \le 11{,}47$ м^3.

В случае гладкой стальной оболочки при указанной расчетной нагрузке должно быть $K_\xi > 120$, что соответствует толщине $h \le 0{,}06$ м и объему материала $V_{об} \le 19{,}44$ м^3.

На рис. 7 представлены зависимости « $q_{кр}$ – $N_р$» (где $N_р$ – число подкрепляющих ребер) для оболочек из стали 40 ХНВ закаленной. Римский номер кривой соответствует номеру варианта анализируемых оболочек.

Проведенные результаты исследования показывают следующее.

При подкреплении оболочек ребрами жесткости размерные критические нагрузки возрастают в несколько раз. Поскольку вблизи критических нагрузок уровень напряжений для многих материалов может превышать допустимый, при исследовании устойчивости оболочек необходимо проводить проверку условия их прочности. Кроме того, высокий уровень напряжений, возникающих в материале оболочек вблизи критических нагрузок, может способствовать развитию пластических деформаций или деформаций ползучести (при долго длящихся нагрузках), что также приведет к потере прочности.

Вот почему при проектировании оболочечных конструкций необходимо проводить расчеты на прочность и устойчивость не только в упругой постановке, но и с учетом возможных нелинейно-упругих (пластических) деформаций и деформаций ползучести.

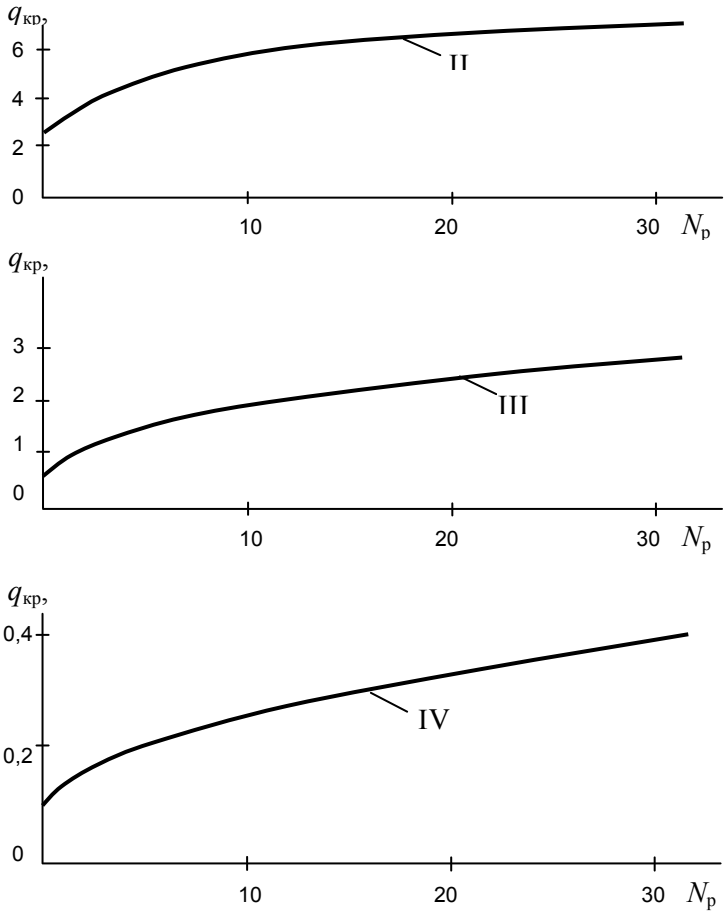


Рисунок 7. Зависимости « $q_{кр}$ – $N_р$» для стальных оболочек вариантов II, III и IV

Литература

1. Карпов В.В., Игнатьев О.В., Сальников А.Ю. Нелинейные математические модели деформирования оболочек переменной толщины и алгоритмы их исследования. М.-СПб, 2002.
2. Жгутов В.М Нелинейные свободные колебания пологих оболочек ступенчато-переменной толщины: Дисс. … канд. техн. наук: 05.23.17: СПб, 2004.
3. Жгутов В.М. Математические модели и алгоритмы исследования устойчивости пологих ребристых оболочек при учете различных свойств материала // Изв. Орловского гос. техн. ун-та. Сер. «Строительство, транспорт». – 2007.– № 4. Орел, 2007. С.20–23.
4. Жгутов В.М., Мухин Д.Е., Панин А.Н. Прочность и устойчивость ребристых пологих оболочек с учетом геометрической и физической нелинейности // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 2 . С. 41–44.
5. Жгутов В.М. Исследование прочности и устойчивости ребристых оболочек с помощью вычислительного эксперимента // Проблемы прочности материалов и сооружений на транспорте: Сборник докладов VII Международной конференции по проблемам прочности материалов и сооружений на транспорте 23-24 апреля 2008 года. СПб., 2008. С. 110-131.
6. Жгутов В.М. Математическая модель и алгоритм исследования прочности и устойчивости ребристых оболочек с учетом различных свойств материала // «Инженерные системы – 2008»: Всероссийская научно-практическая конференция: Труды конференции. Москва, 7-11 апреля 2008 года, РУДН. М., 2008. С. 341-346.
7. Жгутов В.М. Компьютерное моделирование прочности и устойчивости упругих ребристых оболочек // «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения»: Международная конференция (RELMAS'2008): Труды международной конференции. С. –Петербург, 17–20 июля 2008 года, СПбГПУ. СПб., 2008. С. 122-128.

**Владимир Михайлович Жгутов, Санкт-Петербург*

Тел. раб.: +7(812)378-20-83; эл. почта: abc_kitezh@mail.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»
Инженерно-строительный факультет

Отделение повышения квалификации и профессиональной переподготовки

Профессиональная переподготовка специалистов

Программа предназначена для специалистов строительных и проектных организаций, не имеющих базового строительного образования, а также для лиц, желающих получить дополнительное образование по направлению «Строительство».
Форма обучения вечерняя. По окончании обучения выдается диплом о переподготовке государственного образца с правом на ведение нового вида профессиональной деятельности. Программа рассчитана на 500 ак. часов, обучение проводится в течение одного учебного семестра.
Стоимость обучения 46000 рублей.
Переподготовка ведется по четырем направлениям:

Строительство зданий и сооружений	Экономика и управление в строительстве
▪ *Строительные конструкции и материалы* ▪ *Выполнение строительно-монтажных работ* ▪ *Контроль качества строительно-монтажных работ* ▪ *Управление строительной организацией* ▪ *Функции участников инвестиционно-строительного проекта* ▪ *Основы расчета строительных конструкций* ▪ *Проектирование зданий и сооружений с использованием современных программных продуктов*	▪ *Основы строительного дела* ▪ *Технология строительного производства и системы управления качеством в строительстве* ▪ *Основные функции участников инвестиционно-строительного проекта* ▪ *Функции заказчика-застройщика* ▪ *Управление строительной организацией* ▪ *Сметное дело в строительстве* ▪ *Календарное и сетевое планирование в строительстве с использованием MS Project*
Проектирование и конструирование зданий и сооружений	**Инженерные системы зданий и сооружений**
▪ *Основы сопротивления материалов и механики стержневых систем* ▪ *Проектирование и расчет оснований и фундаментов зданий и сооружений* ▪ *Проектирование и расчет железобетонных конструкций* ▪ *Проектирование и расчет металлических конструкций* ▪ *Проектирование зданий и сооружений с использованием AutoCAD* ▪ *Расчет строительных конструкций с использованием SCAD Office*	▪ *Основные понятия механики жидкости и газа* ▪ *Системы вентиляции и кондиционирования. Проектирование, монтаж и эксплуатация* ▪ *Системы отопления. Проектирование, монтаж и эксплуатация* ▪ *Системы водоснабжения и водоотведения. Проектирование, монтаж и эксплуатация* ▪ *Проектирование и монтаж систем электроснабжения* ▪ *Проектирование инженерных сетей и систем с использованием современных программных продуктов*